



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JUSSI KAUPPINEN

KUSTANNUSTEHOKAS SUUNTIMA-ANTURI KAIVINKONEEN TYÖNOHJAUKSEEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Karri Palovuori
Tarkastaja ja aihe on hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa
3. maaliskuuta 2010.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KAUPPINEN, JUSSI: Kustannustehokas suuntima-anturi kaivinkoneen työnohjaukseen

Diplomityö, 68 sivua, 8 liitesivua

Kesäkuu 2010

Pääaine: Elektroniikan laitesuunnittelu

Tarkastaja: professori Karri Palovuori

Avainsanat: Suuntima-anturi, kaivinkone, koneenohjausjärjestelmä, maanrakennus, paikannus

Alati kasvavat tuottavuus- ja laatuvaatimukset sekä ammattitaitoisen työvoiman käyminen yhä harvalukuisemmaksi ovat motivoineet maanrakennusala etsimään uusia työmenetelmiä. Yksittäisen maanrakennuskoneen kohdalla työsuoritusta optimoidaan nykyään koneenohjausjärjestelmällä. Järjestelmä näyttää työkoneen kuljettajalle ohjaamoon sijoitetulla näytöllä työkoneen työkalun kosketuspisteen eli esimerkiksi kaivinkoneen kauhan kärjen sijainnin työmaan digitaalisessa 3D-työsuunnitelmassa, jolloin kuljettava pystyy ohjaamaan koneen työkalua optimaalisesti. Menetelmän edut ovat moninaiset. Työkoneet pystyvät toimimaan itsenäisesti ilman mittamiesten apua, turhat maamassojen siirrot vähenevät ja laadunvarmistuksesta tulee reaaliaikaista.

Koneenohjausjärjestelmä vaatii toimiakseen koneen sisäisen kinematiikka-anturoinnin sekä anturin, jolla koneen sijainti saadaan tarpeellisilta osin sidottua työmaan koordinaatistoon. Tässä diplomityössä tarkoituksena oli kehittää erityisesti kaivinkoneeseen soveltuva suuntima-anturi jälkimmäiseen käyttötarkoitukseen. GNSS-teknologiaa ei voitu hyödyntää, koska anturin oli tarkoitus käyttää myös avustamassa täydellistä GNSS RTK-pohjaista 3D-koneenohjausjärjestelmää GNSS-signaalien tilapäisten häiriöiden aikana.

Teknologiakartoituksen jälkeen päädyttiin toteuttamaan gyroskooppi-avusteinen, sähköisesti kallistuskompensoitu sähköinen kompassi. Suuntima-anturin laitteisto- ja ohjelmistosuunnittelu sekä integrointi sujuivat ongelmitta.

Kenttätesteissä testattiin suuntima-anturin asennettavuutta, kenttäkalibrointien toimivuutta sekä suuntiman tarkkuutta ja luotettavuutta rajatuilla testitapauksilla. Kaivinkone arvioitiin jo ennalta vaikeaksi ympäristöksi magneettiantureille, mikä todennettiin kenttätesteissä.

Magneettiantureiden kenttäkalibroinnit osoittautuivat erittäin haastaviksi ja virheherkiksi. Kaivinkoneen vaaitus horisontaalitasoon ilman erillisiä järeitä apuvälineitä huomattiin mahdottomaksi. Kalibrointien kannalta vaaitus olisi kuitenkin ollut ensiarvoisen tärkeä epäonnistumisen ilmetessä suuntiman riittämättömänä perustarkkuutena. Kallistuskompensointi todettiin periaatteessa toimivaksi, mutta saavutettu tarkkuus ei riittänyt senkään osalta koneenohjauskäyttöön. Kaivinkoneen puomiston liikkeen vaikutus suuntimaan ylitti sekin jo yksistään sallitun kokonaisvirheen. Anturifuusiota ei kehitetty, koska sen ei nähty auttavan testeissä ilmenneiden perustekniikan eli sähköisen kompassin tarkkuus- ja kalibrointiongelmiin.

Tässä työssä ei kaivinkoneen työnohjaukseen soveltuvaa suuntima-anturia syntynyt, mutta tulevaisuudessa erityisesti gyrojen kehitys saattaa avata uusia mahdollisuuksia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Information Technology

KAUPPINEN, JUSSI: Designing a Cost Effective Heading Sensor for
Excavator's Machine Control Applications

Master of Science Thesis, 68 pages, 8 Appendix pages

June 2010

Major: Design of Electronic Circuits and Systems

Examiner: Professor Karri Palovuori

Keywords: Heading sensor, excavator, machine control, construction
industry, machine positioning, CAN, CAN open

Continuously increasing quality and productivity requirements and decreasing amount of skilled operators have motivated the earth moving business to search for new work methods and procedures. Nowadays many construction machines are equipped with machine control system to optimize their efficiency. A machine control system tracks the position of the tool tip relatively to the digital work site 3D model and shows it then to the operator on the cabin mounted display. This allows operator to use the machine in the most efficient way so that only minimal amount of soil is moved. In addition the involvement of the surveyors is minimized and quality assurance data is produced automatically and in real time.

Sensors to position the tool tip in machine's local coordinate system and in site coordinates are crucial components for a machine control system. Developing a heading sensor unit to be used in the latter assignment and in excavator applications was the motivation for thesis. Using GNSS technology to build up a sensor wasn't acceptable due to high costs and the fact that the heading unit was also intended to be used to assist a full GNSS RTK machine control system during short term GNSS signal disturbances. An electrically tilt compensated electric compass with gyro assistance was chosen as technology to implement the heading unit. The actual hardware and software developments were carried out without any abnormal difficulties.

Installation procedure, field calibrations and the heading accuracy were investigated during the field tests. Magnetic anomalies established by the excavator were considered to be a potential threat for the operation of the magnetic field sensors in prior of the actual tests. Unfortunately the pessimistic prognosis became reality.

The field calibration of magnetic sensors was quite impossible to carry out in required accuracy. The main subject was to level the excavator well enough without dedicated heavy leveling equipment. While this wasn't accomplished the target requirements weren't met either even in the most basic tests cases. Tilt compensation worked very well compared to the uncompensated heading but the error exceeded still the total allowed heading error. Also the movement of the booms affected to the heading by creating an error consuming the whole error budget. Sensor fusion combining the magnetic sensors and gyroscope wasn't developed nor tested due to the fact that the compass technology providing the reference heading at the end didn't perform well enough in the magnetic anomalies created by the excavator.

The main goal of developing a heading sensor for excavator machine control applications wasn't accomplished. However, maybe the future will bring more accurate sensors and especially gyroscopes to scale down the challenge to a reachable level.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty osana Axiomatic Technologies Oy:n tuotekehitysprojektia.

Professori Karri Palovuorelle kiitokset ymmärtäväisestä suhtautumisesta työelämän pyörteisiin jo vuosia sitten imaistun diplomityöntekijän kirjoitusprosessiin.

Perhe ja ystävät ovat toimineet selkänäojana tässä yllättävänkin työteliäessä ponnistuksessa. Lämmin kiitos siitä heille kuten myös kollegalleni Kalle Lehtisalolle mallisuorituksesta ja muusta korvaamattomasta avusta. Syvä kumarrus myös pitkän linjan tukijoukoille sinnikkäästä ja sävykkäästä motivoinnista. Pasi, Tuukka, Jenni-sisko ja JP-setä, voitte varmasti luottaa minuun, jos olette joskus vastaavan kannustuksen tarpeessa.

Aivan lopuksi haluan kiittää vielä heikkoa luustoa kirjoitusajan järjestämisestä ja tutkintouudistusta lähtökitkan voittaneen impulssin antamisesta.

Jussi Kauppinen

Tampereella toukukuun 28. 2010

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. SOVELLUSKEHYS JA TYÖN TEORIA	7
2.1. KONEENOHJAUSJÄRJESTELMIEN PERUSTEET	7
2.2. KONEENOHJAUSJÄRJESTELMÄN RAKENNE	9
2.3. KONEENOHJAUSJÄRJESTELMÄN KOMPONENTIT	10
2.3.1. CAN- JA CAN OPEN -PROTOKOLLA	10
2.3.2. KÄYTTÖLIITTYMÄPÄÄTE	16
2.3.3. GNSS-VASTAANOTIN JA GNSS RTK –TEKNOLOGIA	17
2.3.4. INKLINOMETRI- ELI KALLISTUSANTURIT	20
2.3.5. LINEAARIANTURIT JA RESOLVERIT	22
2.3.6. LASERVASTAANOTTIMET	24
2.3.7. VENTTIILIOHJAIMET	24
2.4. KAIVINKONEEN KINEMATIIKKALASKENTA JA SUUNTIMAVIRHE	25
2.5. SUUNTIMA-ANTURI	26
2.5.1. SÄHKÖINEN KOMPASSI	26
2.5.2. GNSS SUUNTIMA-ANTURINA	33
2.5.3. INERTIAALINAVIGOINTIMODUULI	33
2.5.4. MAGNEETTIANTURIELEMENTIT	34
2.5.5. GYRO-ANTURIT	38
3. SUUNNITTELU	41
3.1. SUUNNITTELUVUO	41
3.2. VAATIMUKSET	42
3.3. TEKNOLOGIAVALINTA	43
3.4. PIIRIKAAVIOSUUNNITTELU	44
3.4.1. YLEISET ANALOGIAKOMPONENTTIEN VALINTAPERIAATTEET	45
3.4.2. INKLINOMETRI-ANTURI	46
3.4.3. GYRO-ANTURI	48
3.4.4. MAGNEETTIANTURI	51
3.4.5. ADC-MUUNTIMIEN VALINTA	54
4. KENTTÄTESTAUS	57
4.1. KENTTÄKALIBROINNIT	58
4.2. KENTTÄTESTIEN SUORITUS	60
4.3. KENTTÄTESTAUKSEN ANALYYSI	62
5. PÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO	65
LÄHTEET	68

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

GNSS	Satelliittipaikointusjärjestelmien yleisnimi (engl. Global Navigation Satellite System).
RTK GNSS	Reaaliaikaisen, senttimetriluokan paikannuksen tuottava satelliittipaikointusjärjestelmäpohjainen paikannus, jossa liikkuvat vastaanottimet hyödyntävät kiinteiden vastaanotintukiasemien lähettämää korjausdataa (engl. Real Time Kinematics Global Navigation Satellite System).
GPS	Yhdysvaltojen puolustusvoimien hallinnoima siviili- ja militaarikäytössä oleva satelliittinavigointijärjestelmä (engl. Global Positioning System).
GLONASS	Venäjän puolustusvoimien hallinnoima siviili- ja militaarikäytössä oleva satelliittinavigointijärjestelmä.
GALILEO	Eu:n rahoittama ja siviiliviranomaisten hallinnoima, arviolta vuonna 2013 operatiivisen käyttöön otettava satelliittinavigointijärjestelmä.
Saatavuus	GNSS:n tapauksessa tarkoitetaan paikannuksen saatavuutta eli käytännössä sitä onko satelliitteja riittävästi näkyvissä (engl. Availability).
COMPASS	Kiinan kaavailema satelliittinavigointijärjestelmä.
MEMS	Mikroelektromekaniikka yhdistää erittäin pieniä mekaanisia rakenteita ja elektroniikka. Teknologiaa käytetään laajalti anturielementtien valmistuksessa
Takymetri	Optinen koneenohjauksessa ja maanmittauksessa käytetty mittalaite.
Soft iron -ilmiö	Materiaalin, jolla ei yleensä ole omaa magneettikenttää, aiheuttama magneettikentän vääristymä tai häiriö
Hard iron -ilmiö	Magneettikentän offsettina ilmenevä vääristymä tai häiriö.

1. JOHDANTO

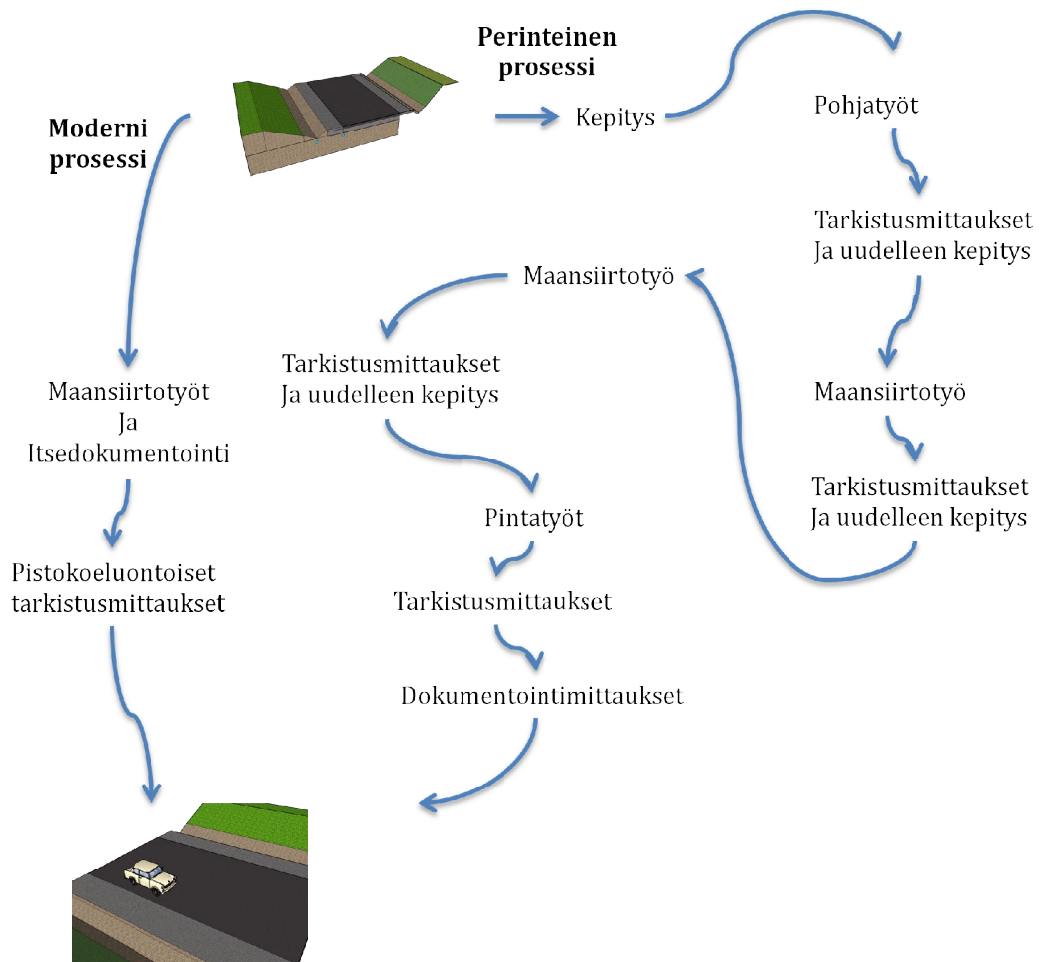
Alati kasvavat tuottavuus- ja laatuvaatimukset sekä ammattitaitoisen työvoiman käyminen yhä harvalukuisemmaksi ovat motivoineet maanrakennusala etsimään uusia työtapoja. Uusi johtoajatus on, että esimerkiksi moottoritien rakennustyö on yhtenäinen prosessi eikä niinkään keskenään heikosti kommunikoivien työvaiheiden ketju. Muutosta on lähdetty toteuttamaan keinolla, jota monet yhteiskunnan toimijat ja teollisuuden alat ovat jo hyödyntäneet pääosin hyvällä menestyksellä, eli tietotekniikalla.

Perinteinen työkulku isolla maanrakennustyömaalla on pääpiirteissään ollut seuraavanlainen. Suunnittelija tekee piirustukset tietokoneella, mutta suunnitelmat välitetään eteenpäin usein kuitenkin paperitulosteina. Ryhmä maanmittaajia lähtee työmaalle mukanaan piirustukset, RTK GNSS -käsivastaaotin sekä muutama peräkärryllinen noin metrin mittaisia puupalikoita. RTK GNSS -käsivastaaotin on reaaliajassa senttimetriluokan tarkkuuteen yltävä, kädessä kannettava, yleensä useita paikannussatelliittijärjestelmiä, kuten GPS- ja GLONASS-järjestelmiä ymmärtävä laite.

Puupalikoilla maanmittaajat merkitsevät käsivastaaottimella paikannetut ensimmäisen vaiheen linja- ja korkomerkinnät. Esimerkiksi tien tapauksessa alan ja syvyyden, jolta poistetaan maa-aines. Seuraavaksi kaivinkoneet, puskutraktorit ja muut maansiirtokoneet valtaavat työmaan. Koneiden kuljettajat yrittävät parhaansa mukaan noudattaa korko- ja linjamerkkejä ja visualisoida merkkien välisiä korkolinjoja. Merkkeihin ei tosin voi luottaa sokeasti, sillä ne joutuvat monesti tahattomasti yliajatuiksi. Koneiden seassa maanmittaajat tekevät tarkistusmittauksia ja seuraavan työvaiheen korko- ja linjamerkintöjä. Merkinnästä, maansiirtotyöstä, tarkistusmittauksista ja korjauksista muodostuvaa ketjua toistetaan kunnes työ on lopulta valmis.

Edellisessä kappaleessa ja kuvassa 1.1 kuvattu prosessi on kaukana optimaalisesta ja jo sen pintapuolinen maalaisjärkeenkin perustuva pohdiskelu paljastaa lukuisia puutteita, jotka pitävät tuottavuuden matalana ja altistavat laatuongelmille. Nämä ongelmat ovat seurausta reaaliaikaisen työnohjauksen, laadunvarmistuksen sekä informaation välityksen puuttumisesta. Käytännössä esimerkiksi työkoneiden kuljettavat joutuvat arvioimaan silmämääräisesti, missä korkotasossa kulloinkin työskentelevät, tiedot suunnitelmien muutoksista ja korjauksista eivät välity välttämättä kaikille ja päivitettyjen suunnitelmien käyttöönotto vaatii yleensä mittamiehen käynnin. Virheet huomataan usein vasta päivien tai jopa viikkojen viiveellä eikä työnjohdolla saati muulla projektiorganisaatiolla ole ajantasaista ja tarkkaa tietoa liikutelluista maamassoista, saavutetuista korkopinnoista eikä siten myöskään työn edistymisestä.

Mikäli vaikkapa ostoskeskuksen perustustöissä kaivetaan tonttipohjaa hehtaarin alalta vahingossa 20 senttimetriä liian syväksi, niin tontilta on siirretty turhaan noin 2000 kuutiometriä maa-ainesta, mikä vastaa noin 150:tä kolmiakselillisen kuorma-auton hyötykuormaa. Ja pahimmassa tapauksessa massa on vielä tuotava ja levitettävä takaisin tontille.



Kuva 1.1: Moderni vs. perinteinen maanrakennusprosessi

Modernissa maanrakennusprosessissa mahdollisimman moni maa-ainesta käsittelevä kone on varustettu koneenohjausjärjestelmällä. Varusteltavia koneita ovat esimerkiksi kaivinkoneet, puskutraktorit, jyrät, tiehöylät sekä kallioporat. Koneenohjausjärjestelmä paikantaa työkonen työkalun, kuten kaivinkoneen kauhan kärjen työmaan koordinaatistossa ja näyttää sijainnin kuljettajalle ajoneuvotietokoneen näytöllä kuten kuva 1.2. havainnollistaa. Perinteisen karttapohjan sijaan sijainti näytetään yleensä suunnitteludatan sisältävässä työmaan 3D-mallissa.



Kuva 1.2: 3D-näkymä käyttöliittymäpaneelilla

Digitaalinen suunnitelma tuodaan työkoneseen esimerkiksi USB-muistitikulla tai yhä useammin langattoman verkkoyhteyden yli. Langattomuus varmistaa sen, että mahdollisimman monella koneella on käytössä aina ja ainoastaan tuorein suunnitteludata. Langattomuus mahdollistaa reaaliaikaisen tiedonsiirron myös koneesta konttorin suuntaan, mikä on taas edellytyksenä työsaavutusten reaaliaikaiselle seurannalle sekä laadunvarmistukselle. Voidaankin sanoa, että langattomuus on yksi avaintekijä reaaliaikaisessa informaation välityksessä ja työnseurannassa.

Koneenohjausjärjestelmien pääluokat ovat 2D- ja 3D-järjestelmät. 2D-järjestelmässä työkonen työkalu paikannetaan koneen paikalliskoordinaatistossa ainoastaan X- ja Z-suunnissa. Eli esimerkiksi kaivinkoneen tapauksessa tunnetaan kauhan kärjen kohtisuora etäisyys ja korkeus koneen sisäisestä referenssipisteestä. Koneen koordinaatistoa ei tällöin voida myöskään kiinnittää työmaan koordinaatistoon muuten kun rajoitetusti X- ja Z-suunnissa. 2D-koneenohjausjärjestelmällä varustetulla kaivinkoneella pystytään tekemään yksinkertaisia kaivantoja kuten ojia sekä tavoitekorkotasoltaan täuysin horisontaalisia pintoja kuten esimerkiksi talojen pohjatöitä.

3D-koneenohjausjärjestelmä osaa paikantaa työkalun täydellisesti eli XYZ-suunnissa vähintäänkin koneen paikalliskoordinaatistossa. Mikäli järjestelmään kuuluu GNSS-vastaanotin, saadaan koneen koordinaatisto sidottua täydellisesti myös työmaan koordinaatistoon. Usein kuitenkin riittäisi 3D-paikannus koneen paikalliskoordinaatistossa ja pelkästään korkoreferenssi saaminen työmaan koordinaatistosta. Tällaista järjestelmää kutsutaan tässä diplomityössä kevennetyksi 3D-koneenohjausjärjestelmäksi. Tyypillisiä sovelluskohteita sille ovat kaivinkoneella tehtävät yhteen suuntaan kallistetut tasot eli luiskat.

RTK GNSS -teknologia tarjoaa erittäin tarkkaa paikannusta, muttei aivan ongelmitta ja haasteita. Tarkkaan navigointiratkaisuun tarvitaan vähintään viisi satelliittia, joiden pitää vielä hajasijoittua taivaalle mahdollisimman etäälle toisistaan. 3D-paikkannustarkkuus on sitä parempi, mitä suurempi satelliittien muodostaman monikulmion tilavuus on.

Tällä hetkellä toiminnassa on kaksi satelliittinavigointijärjestelmää, amerikkalaisten hallinnoima GPS ja venäläisten GLONASS. Järjestelmissä on yhteensä periaatteessa 48 satelliittia, joista kuusi on varasatelliitteja. Satelliittien lukumäärä on sinänsä riittävä, mutta ongelmana on, että GPS-satelliittien konstellaatio jättää pohjoismaat huonoon asemaan. GLONASS-satelliittien radat kulkevat sen sijaan korkeammalta Suomen taivaankannen yli, mutta valitettavasti Venäjän resurssit eivät ole riittäneet satelliittien uusimiseen niiden elinkaaren edellyttämällä tahdilla. Yhteisvaikutus edellisistä on, että satelliitteja ei yksinkertaisesti aina ole riittävästi näkyvissä tai riittävän edullisesti sijoittuneena koneenohjauksessa tarvittavaan, senttimetriluokan paikkaratkaisuun, jonka saatavuus (englanninkielinen termi availability) on riittävä.

Yksi keskeinen ongelma yksiantennista RTK GNSS -vastaanotinta käytettäessä on, että työkoneen suuntiman ratkaiseminen edellyttää antennin liikkumista. Käytännössä paikallaan olevan työkoneen suuntaa ei voida varmuudella määrittää ja hitaasti, mutta vaihtelevalla nopeudella liikkuvan työkoneen pieniä ja usein tapahtuvia suunnanmuutoksia on joskus vaikea seurata reaaliajassa. Jälkimmäinen vaikeuttaa yksiantennisen vastaanottimen käyttöä erityisesti puskutraktorin kaltaisissa työkoneissa, joissa työkalun suunta noudattaa konetta liikuttavan alustan suuntaa. Vaikeuksia tuottaa myös GNSS-vastaanottimen kylmäkäynnistys, jonka jälkeen järjestelmä ei voi päätellä koneen orientaatiota antennin suhteen ennen kun kone on lähtenyt liikkeelle. Liikkeellelähdon jälkeenkin saavutetaan vasta osaratkaisu, sillä järjestelmä ei tiedä ajetaanko eteenpäin vai peruutetaanko. Eteen taakse -suunta on kuitenkin yleensä erittäin oleellinen, sillä työkalu sijaitsee harvoin täsmälleen antennin alapuolella. Ylimääräisen anturin lisäksi voidaan käyttää yksinkertaista joskin noloa ratkaisua eli kysyä kuljettajalta koneen liikahtaessa ensimmäistä kertaa onko hän peruuttamassa vai ajamassa eteenpäin. Tämän jälkeen eteen taakse -ongelmaa ei enää ole, kunhan antennia ei ole asennettu typerästi tarkalleen koneen pituussuuntaiselle keskilinjalle eikä vastaanotin hukkaa paikkaratkaisua syystä tai toisesta. Kaivinkoneen kaltaisissa koneissa, joissa koneen tela- tai pyöräalusta voivat kääntyä ilman, että antenni kääntyy, kylmäkäynnistysongelma ja työkalun suuntima ratkeaa helposti ylävaunua kääntämällä. Toisaalta orientaatio myös hukkuu varsin helposti, mikäli kaivinkone pääsee tahattomasti liikkumaan paikaltaan kaivettaessa. Kaksoisantennillinen vastaanotin ratkaisee tässä kappaleessa esitetyt ongelmat. Haittapuolena on kuitenkin GNSS-

vastaanottimen hinnan karkeasti ottaen kaksinkertaistuminen kaksoisantenniratkaisun myötä.

Kaupunkiympäristö luo omat haasteensa paikannukseen myös Keski-Euroopassa tai Pohjois-Amerikassa eli sellaisillakin alueilla, jotka satelliitit ylittävät korkeilla ja lentoradoilla. Pohjoismaissa ongelma vielä korostuu satelliittien lentoratojen kulkiessa lähempänä horisonttia. Satelliittisignaalien korkeista rakennuksista johtuva häilyntä ja monitie-eteneminen paitsi heikentävät paikannustarkkuutta aiheuttavat myös suoranaisia katkoksia paikannukseen. Paikannuksen saatavuus onkin tiiviissä kaupunkiympäristössä ja eritoten pohjoismaissa harmillisen heikkoa ja epäluotettavaa.

RTK GNSS -vastaanottimet ovat melko hintavia laitteita. Tyypillisesti kaksoisantennillisella RTK GNSS -vastaanottimella varustetun 3D-koneenohjausjärjestelmän hinta on noin kolmin- tai nelinkertainen 2D-järjestelmään nähden. Euroissa puhutaan tällöin noin 30000 - 45000 euron hankintakustannuksista RTK GNSS 3D -koneenohjausjärjestelmälle. Monet työtehtävät ovat kuitenkin tavoitekorkotopologialtaan sellaisia, että niissä pärjättäisiin kevennetyllä 3D -järjestelmällä. Sen keskeisenä osana olisi suuntima-anturi, joka tarjoaisi työkonetta suuntiman vähintäänkin koneen paikalliskoordinaatistossa ja ideaalitapauksessa myös absoluuttisena suuntimana, jolloin työkalun suuntima pystyttäisiin sitomaan myös työmaan koordinaatistoon.

RTK GNSS -paikannuksen saatavuus- ja tarkkuusongelmien sekä riittävän yksinkertaisten työtehtävien avaamien kustannussäästömahdollisuuksien takia koneenohjausjärjestelmissä on tilaus kustannustehokkaalle suuntima-anturille. RTK GNSS -vastaanottoon nähden edulliseen, korkeintaan noin 2500 euron myyntihintaan anturin pitäisi ratkaista mahdollisimman moni edellä esitetyistä, yksi- ja kaksoisantennillisistä RTK GNSS -paikannustekniikoista vaivaavista ongelmista sekä olla käyttökelpoinen myös koneenohjausjärjestelmissä, joihin GNSS-vastaanotin on liian kallis vaihtoehto, mutta joissa kuitenkin tarvitaan koneen suuntimaa.

Suuntima-anturin tulee olla riittävän tarkka ja nopea. Absoluuttisen tarkkuuden tulisi olla vähintään ± 0.5 astetta, jotta suuntimavirheestä johtuva korkovirhe jää alle yhden senttimetrin työstettäessä kaivinkoneella kymmenen prosentista luiskaa. Anturin on kestävä työkonerympäristön mekaanisia, kemiallisia sekä sähköisiä rasituksia ja oltava liitettävissä koneenohjausjärjestelmän CAN open -väylään.

Tässä diplomityössä keskitytään erityisesti kaivinkonekäyttöön soveltuvan suuntima-anturiin. Maalina on vaatimukset täyttävä, esisarjavalmis suuntima-anturi. Projektissa on kuitenkin epävarmuustekijänsä, sillä vastaavaa, riittävän hyvin toimivaa tuotetta ei ole ennestään markkinoilla.

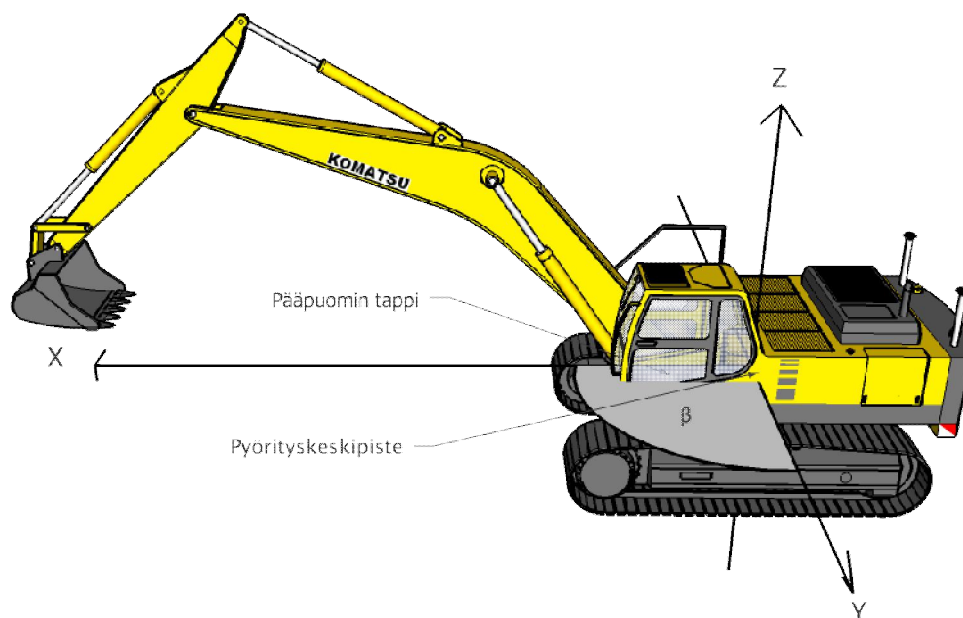
Kappaleessa 2 esitetään työn teoria ja tarkennetaan työn taustoja kuten koneenohjausjärjestelmän toimintaa ja komponentteja. Samalla esitetään kaivinkoneen

kinematiikkalaskentaa työn kannalta tarpeellisilta osilta. Suuntima-antureiden toteutusvaihdot etuineen, haittoineen ja tärkeimpine komponentteineen tulevat myös esitellyiksi. Näin luodaan teoreettinen pohja kappaleessa 3 esitettävälle suuntima-anturin suunnittelutyölle. Kappaleessa 4 esitetään kenttätestit sekä niiden tulokset. Kappaleessa 5 käydään läpi johtopäätökset ja ideoidaan jatkokehitystä.

2. SOVELLUSKEHYS JA TYÖN TEORIA

2.1. Koneenohjausjärjestelmien perusteet

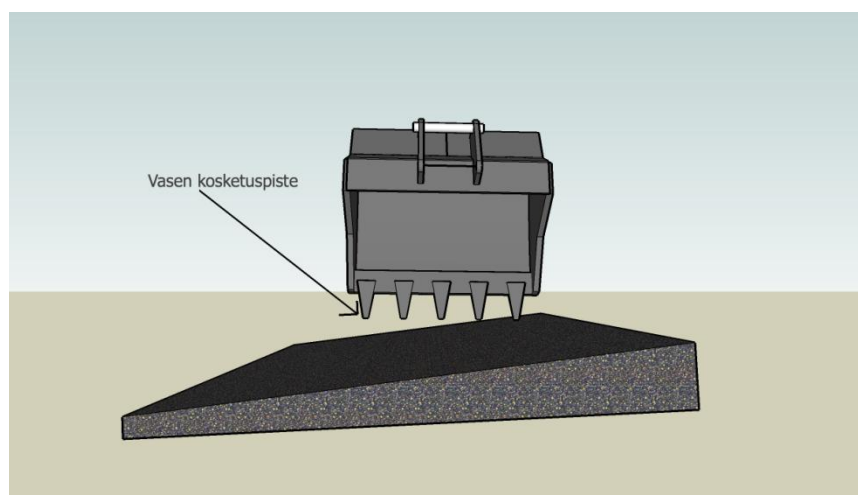
Kuten jo johdannossa kerrottiin, niin koneenohjausjärjestelmien perusjako on 2D- ja 3D-järjestelmät. 2D-järjestelmä toimii pääasiassa koneen paikalliskoordinaatistossa 3D-järjestelmän sitoessa työkonen täysin työmaan koordinaatistoon. 2D- ja 3D-järjestelmän väliin sijoittuu kevennetty 3D-järjestelmä, joka laajentaa 2D-järjestelmän käyttömahdollisuuksia 3D-järjestelmän suuntaan ollen kuitenkin viimeksi mainittua huomattavasti edullisempi sekä hankintahinnaltaan, että käyttökustannuksiltaan. 2D-järjestelmä on perusta, jonka päälle voidaan yleensä inkrementaalisesti rakentaa monipuolisemmat ja enemmän ominaisuuksia tarjoavat kevennetty 3D- tai täydellinen 3D-järjestelmä.



Kuva 2.1: Kaivinkoneen paikalliskoordinaatisto

Kuvassa 2.1 nähdään tyypillinen ja myös tässä työssä käytetty kaivinkoneen koneenohjausjärjestelmän paikalliskoordinaatisto. X-koordinaatti ilmoittaa kauhan kärjen kohtisuoran etäisyyden origosta Z-koordinaatin kertoessa kauhan korkeuden suhteessa origoon. Y-koordinaatti antaa kauhan sivuttaispoikkeaman, joka voidaan käsitellä myös koneen kiertokulmana β . Kiertokulmasta käytetään tässä työssä nimeä suuntima. 2D-järjestelmä tuntee ainoastaan X- ja Z-koordinaatit. Koska Y-koordinaattia ja siten ei myöskään koneen suuntimaa tunneta, käytetään origona yleensä pääpuomin tyvitappia koneen pyörimiskeskusteen sijaan.

Mikäli kaivinkoneen työkalu on varustettu poikittaiskallistimella tai mikäli koneen suuntima pystytään havaitsemaan, on oleellista määritellä myös työkalun kosketuspiste. Yleensä kuljettaja voi valita sopivan kolmesta kosketuspisteestä, jotka ovat vasen- ja oikealaita sekä keskikohta. Kosketuspisteen merkitys näkyy selvästi kuvassa 2.2. Tässä työssä käytetään selkeyden vuoksi aina kauhan keskistä kosketuspistettä, ellei toisin mainita.



Kuva 2.2: Kosketuspisteen vaikutus poikittaisluiskassa

2D-järjestelmässä kaivinkoneen koordinaatistoa ei pystytä kiinnittämään työmaan koordinaatistoon muuten kuin hyvin rajoitetusti X- ja Z-suunnissa. Tästä huolimatta kaivinkoneen 2D-koneenohjausjärjestelmä sopii hyvin yksinkertaisten kapeiden kaivantojen, kuten ojien tekemiseen kunhan kaivannon kulkulinja on merkitty tai kuljettajan päätettävissä. Järjestelmä sopii auttavasti myös tavoitekorkotasoltaan vakiohorisontaalipintojen kuten esimerkiksi talojen pohjatöihin, mutta tällöin koneessa on oltava tasolaservastaanotin ja työmaalla korkoreferenssin antava tasolaser. Lisäksi on muistettava, että koneen ylärunгон kääntäminen kaltevalla alustalla korkoreferenssin poimimisen jälkeen johtaa välittömästi paikannusvirheeseen, sillä 2D-koneenohjausjärjestelmä ei pysty luotettavasti havaitsemaan ylärunгон kääntymistä.

Kaivettaessa yksinkertaista kaivantoa 2D-koneenohjausjärjestellä varustellulla kaivinkoneella ei ulkoista korkoreferenssiä välttämättä tarvita muuta kun enintään ojan alkupisteessä koron määrittämiseksi. Koneenohjausjärjestelmä pystyy mittaamaan edettyä matkaa sekä siirtämään korkoreferenssiä, kunhan kone pidetään kaivettaessa paikallaan. Kun kaivamista ei voida enää nykyiseltä paikalta jatkaa ja konetta olisi siirrettävä, kuljettaja vie työkalun kosketuspisteen johonkin selkeään paikkaan kaivannossa kuten vaikkapa kiven päälle ja käskee järjestelmää poimimaan pisteen referenssiksi. Järjestelmä tallettaa tällöin pisteen koron ja etäisyyden. Paikkaa voisi kutsua tähän jäätiin -pisteeksi ja sen X- ja Z-koordinaatit ovat työmaan koordinaatistossa suhteessa työn aloituspisteeseen. Seuraavaksi kuljettaja siirtää konetta kaivannon suunnassa, jonka jälkeen hän vie työkalun kosketuspisteen äskeisen referenssipisteen päälle ja kuittaa pisteen äskeiseksi tähän jäätiin -pisteeksi. Piste sitoo koneen paikalliskoordinaatiston jälleen työmaan koordinaatistoon. 2D-järjestelmä voisi luonnehtia vatupassilla varustetuksi korkeus- ja matkamittariksi.

Kevennetyllä 3D-järjestelmällä koneen ylärungon suuntima pystytään havaitsemaan. Tällöin pystytään hyödyntämään kaivinkoneen koko työskentelyaluetta, jolloin esimerkiksi teiden pengerrysten ja leveiden kaivantojen tekeminen tehostuu huomattavasti. Kuva 2.2 visualisoi miksi koneen sivuittaisliikkeen eli suuntiman havaitseminen on oleellista leveitä luiskia tai poikittaisluiskia tehdessä. Koneen ylärungon kääntäminen vastaa kuvassa kauhan siirtämistä sivulle, mikä selvästikin vaikuttaa oleellisesti tavoitekorkoon.

2.2. Koneenohjausjärjestelmän rakenne

Koneenohjausjärjestelmän rakenne riippuu jonkin verran työkoneesta. Konetyypistä riippumattomia, yhteisiä komponentteja 3D-koneenohjausjärjestelmässä ovat yksi tai kaksiantenninen GNSS -vastaanotin sekä käyttöliittymäpaneeli. Yksiantennisen GNSS -vastaanotton tapauksessa tai mikäli GNSS-antenni tai -antenneja ei ole kiinnitetty suoraan työkaluun kuten puskutraktorin puskulevyyn tai kaivinkoneen kauhaan, tarvitaan myös koneen rungon kallistusta mittaavaa kallistusanturi. Mikäli GNSS-antennien ja paikannettavan työkalun kärjen välissä on liikkuvia osia kuten puomeja, on nekin anturoitava. Tyypillisesti puomiantureina käytetään koneen runkoanturin tapaan kallistusantureita, mutta jossain tapauksissa käytetään myös nivelpisteisiin asennettavia, inklinometrianantureihin verrattuna vähemmän häiriöherkkiä, resolveriantureita tai hydraulikkasyylintereiden sisään asennettavia lineaariantureita. Yleensä kuitenkin tyydytään kallistus- eli inklinometrianantureihin niiden huomattavasti helpomman jälkiasennettavuuden sekä halvemman hinnan vuoksi. Moduulit on useimmiten liitetty toisiinsa työkonekäyttöön hyvin soveltuvalla CAN-väylällä.

Kaivinkoneessa GNNS-antenneja ei rankasta ympäristörasituksesta johtuen voida asentaa suoraan kauhaan eikä puomistoon, jottei antennien elinikäennuste lyhenisi muutamisiin tunteihin. Antennit asennetaan kaivinkoneessa koneen ylärungon takaosaan ja yleensä mahdollisimman kauaksi koneen pyörityskeskisteestä suuntimatarkkuuden maksimoimiseksi kuvan Kuva 2.1 tapaan.

Kaivinkoneen 2D-koneenohjausjärjestelmään kuuluu 3D-järjestelmän tapaan ohjaamoon sijoitettu käyttöliittymäpääte, rungon kallistusanturi, pää- ja kaivuupuomin sekä työkalun kallistusanturit. 3D-järjestelmään nähden säästytään GNSS-vastaanottimen ja -antennin tai -antennien hankinnalta. Kevennetyssä 3D -järjestelmässä GNSS-teknologiaan liittyvät komponentit luonnollisesti puuttuvat. Suuntima-anturi on asennettu yleensä konepellin päälle jompaan kumpaan takanurkkaan samaan tapaan kun kuvan 2.1 GNSS-antennit on asennettu.

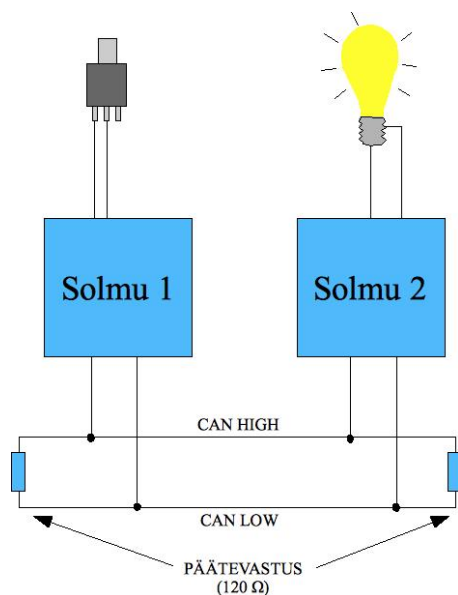
2.3. Koneenohjausjärjestelmän komponentit

Tässä kappaleessa esitellään koneenohjausjärjestelmien työkoneen tason komponentit sekä niiden toimintaperiaatteet. Suuntima-anturia ja sen teoreettista pohjaa käsitellään omassa kappaleessaan tarkemmin. Komponenttien lisäksi käsitellään CAN- ja CAN open -protokollia, jotka muodostavat yhdessä paitsi suositun myös erittäin oleellisen osan koneenohjausjärjestelmää toimiessaan koneenohjausjärjestelmän konetason komponenttien välisenä kommunikointiväylänä.

Työkoneympäristössä komponenteille yhteisiä vaatimuksia ovat rankkojen sähköisten, mekaanisten ja kemiallisten ympäristöolosuhteiden sekä laajojen lämpötilavaihteluiden sietokyky.

2.3.1. CAN- ja CAN open -protokolla

CAN-protokolla on saavuttanut auto- ja työkoneympäristössä lähes de facto -aseman koneen sisäisenä kommunikointiväylänä. Protokolla on kehitetty erityisesti hajautettuihin ohjausjärjestelmiin eikä se sovellu suurten datamäärien, kuten esimerkiksi kuvan tai äänen siirtoon. Alla oleva kuva Kuva 2.3 selventää hajautetun ohjausjärjestelmän ideaa yleensä ja esittää CAN-väylän yleisimmin käytetyn lineaarisen verkkorakenteen sekä väylän keskeisimmät komponentit.

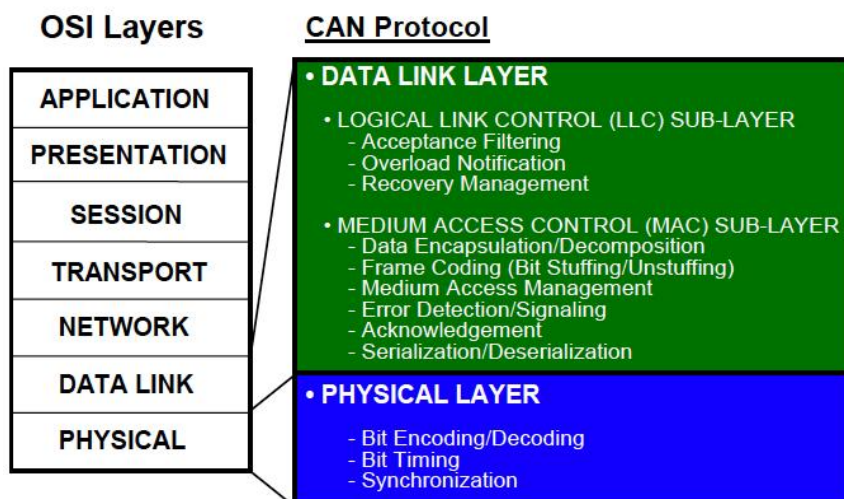


Kuva 2.3: CAN-väylän peruskomponentit ja rakenne

Hajautetussa ohjausjärjestelmässä keskenään kommunikoivat anturit, toimilaitteiden ohjausmoduulit ja järjestelmän älyn sisältävät kontrollimoduulit on sijoitettu yleensä funktionaalisesti ja mahdollisimman lähelle varsinaisten anturoitavaa kohdetta tai ohjattavaa toimilaitetta keskeisenä tarkoituksena minimoida kaapelointi. Täysin päinvastaisessa lähestymistavassa järjestelmässä olisi yksi itsenäinen älykäs IO-moduuli, johon kaikki anturit ja toimilaitteet on kytketty suoraan.

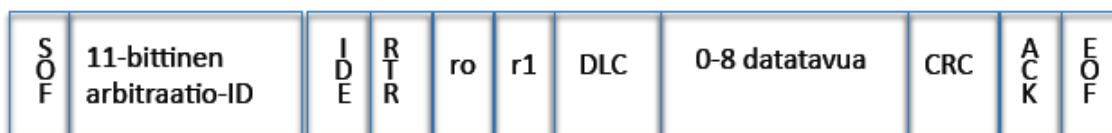
CAN-väylä koostuu solmuista (node), jotka on liitetty yleensä kaksijohtimisella kierretyllä kuparikaapelilla toteutettuun väylään, jonka molemmissa päissä on 120Ω :n päätevastukset. Solmuja voi olla väylässä yleensä enintään noin 100 kappaletta. Väylän toimii broadcasting-periaatteella, eli kaikki solmut kuulevat lähettävän solmun sanoman.

CAN-protokolla määrittelee OSI-verkkomallin mukaiset kerroksen 2 ja osittain kerroksen 1 eli Data link – ja Physical -tasot kuten kuvassa 2.4 on esitetty. CAN-protokollasta käsitellään seuraavassa tarkemmin datan kapselointia eli yksittäisen viestin rakennetta.



Kuva 2.4: CAN OSI-verkkomallissa. [1, s. 6. ; 2, s. 23.]

Kuvassa Kuva 2.5: CAN-viestin nähdään yksittäisen CAN-viestin rakenne. Viestin tärkeimmät osat väylän käyttäjän kannalta ovat 11-bittinen viestin tunniste eli viesti-ID sekä varsinaista hyötykuormaa kantava dataosio. Viesti-ID:n tulkinta riippuu ylemmän tason protokollasta, mutta esimerkiksi CAN openin tapauksessa viesti-ID kertoo lähettäjän tai vastaanottajan sekä antaa viitteen viestin sisällöstä. Dataosion pituus voi vaihdella nollan ja kahdeksan tavun välillä. Viestin vastaanottajalle pituus kerrotaan DLC-kentän avulla.



Kuva 2.5: CAN-viestin rakenne

Yhteenveto viestin eri kenttien merkityksistä sekä pituuksista löytyy alla olevasta taulukosta.

Taulukko 2.1: CAN-viestin kentät

Lyhenne	Selitys	Koko bitteinä
SOF	Lähetyksen aloitusmerkki	1
ID	Viestin tunnistekenttä	11
IDE	Identity extended, Bitti kertoo onko 29-bittiset viesti-ID:t käytössä	1
RTR	Remote Transmission Request, RTR-kehyksen tunniste	1
R0	Varattu tulevaisuuden laajennuksille	1
R1	Varattu tulevaisuuden laajennuksille	1

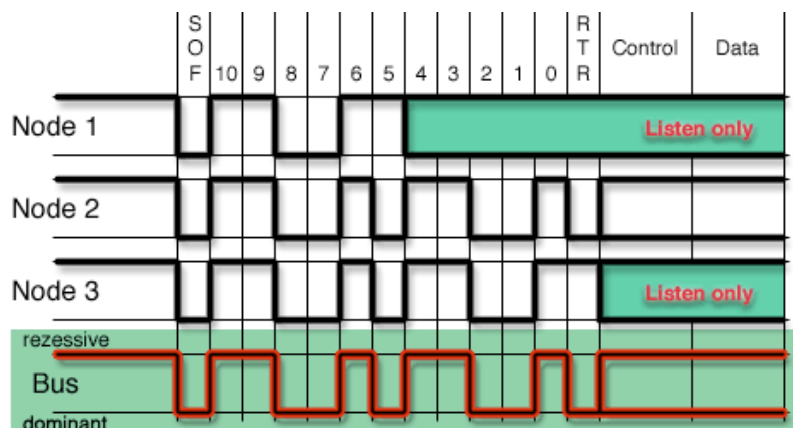
DLC	Kenttä kertoo hyötydatatavujen määrä	4
DATA	Hyötydata. Pituus on 0-8 tavua	0-8
CRC	Kenttä sisältää tarkistussumman	16
ACK	Onnistuneen lähetyksen kuittauskenttä	2
EOF	Kehyksen loppumerkkikenttä	7
Yhteensä		45 + datatavut*8

Yhden CAN-viestin pituus on minimissään 45 bittiä. Lisäksi viestin pituuteen vaikuttaa hyötykuormatavujen määrä, joka voi siis vaihdella nollan ja kahdeksan tavun välillä. Viestin enimmäiskokonaispituudeksi tulee tällöin $45 + 8 \cdot 8$ eli 109 bittiä. Suurimmalla standardin mukaisella väylänopeudella, 1 Mbps, kyseinen viesti varaa väylän 109 μ s:n ajaksi. Väylän maksimikapasiteetiksi saadaan näin noin 9400 kappaletta enimmäismittaisia viestejä sekunnissa, mikä riittää jo melko laajoihin, kovaakin reaaliaikaisuutta vaativiin mittaus- ja ohjaussovelluksiin työkoneympäristössä. Alimmalla 1 Mbps -nopeuteen nähden moninkertaiset väyläpituudet mahdollistavalla 125 kbps -nopeudella maksimiviestejä mahtuu väylälle sekunnissa noin 1175 kappaletta, mikä sekin on jo useimpiin sovelluksiin varsin riittävä määrä.

Toimivan CAN-väylän väyläkuorma voi olla teoriassa täydet 100 prosenttia, mikä on ei-tuhoavan kilpavaraukseen ansiota. Alla olevassa kuvassa Kuva 2.6 nähdään wired-or -tyyppisen kilpavarauksen toiminta kolmen väylään liitetyn solmun yrittäessä lähettää viestinsä yhtä aikaa väylälle. Solmut (node) lähettävät viesti-ID:tään bitti kerrallaan väylälle tarkkaillen samalla asettuuko väylän tila bitin mukaiseksi. Mikäli näin tapahtuu, jatkaa solmu kilvassa mukana. Muussa tapauksessa solmu siirtyy loppuviestin ajaksi kuuntelumoodiin (listen only). Kuvassa nähdään kuinka solmu 1 tippuu kilvasta ensimmäisenä yrittäessään siirtää viesti-id:nsä viidennen resessiivisen bitin väylälle. Kilpailu etenee RTR-bittiin asti, jossa solmu 3 tippuu kisasta.

Kilpavaraustekniikka edellyttää, että viesteillä on yksilöllinen viesti-ID. Viesti-ID:stä ei selviä viestin lähetyssijainta tai juokseva järjestysnumero vaan yleensä viestin lähettäjä tai vastaanottaja ja aina vähintään viestin tarkoitus eli viestityyppi.

11-bittisen viesti-ID -kentän avulla väylässä voidaan lähettää teoriassa 2048:aa erilaista viestiä. Käytännössä viestitunnisteiden valinta ei ole kuitenkaan täysin vapaata vaan ylempien protokollien kuten CAN open:n rajaama. Viesti-ID:hen perustuva kilpavaraustekniikka luo viesteille myös prioriteetit: Pienimmän ID:n viesti pääsee aina halutessaan väylälle. Tämä luo järjestelmään epädeterministisyyttä, mikä saattaa johtaa huonoimmassa tapauksessa siihen, että jokin korkeaprioriteettinen viesti voi varata käytännössä koko väylän kapasiteetin itselleen tai vähintään estää jonkun yksittäisen viestin pääsyn väylälle. Tällöin on kuitenkin kyse joko pieleen menneestä järjestelmäsuunnittelusta tai solmun sekoamisesta.



Kuva 2.6: CAN-väylän ei-tuhoava wired or -kilpavaraus [3]

CAN-protokollan fyysisen kerroksen määrittelyä täydentää *ISO 11898-2 high speed* -spesifikaatio. Käytännössä siirtotie koostuu tällöin 120 Ω :n ominaisimpedanssista kaksijohtimisesta kupariparikaapelista, jossa signaalit välitetään differentiaalisena. Kuparikaapelin käyttäminen yksinkertaistaa järjestelmäkaapelointia, kun minimissään yhdellä nelijohtimellisella kaapelilla voidaan hoitaa sekä väylään kiinnitettyjen moduulien välinen kommunikointi, että moduulien tehonsyöttö. Ajoneuvo- ja työkonerympäristössä tällainen kaapelointiratkaisu onkin hyvin yleinen kustannustehokkuutensa ja yksinkertaisuutensa ansiosta.

CAN-väylän keskeisimmät ominaisuudet ovat hyvä häiriönsietokyky, riittävät väyläpituudet, ohjausväyläkäyttöön sopiva toimintafilosofia sekä riittävä kaistanleveys, laitteisto- ja ohjelmistotoimintojen keveys sekä laaja mikrokontrollereiden oheispiirituki.

CAN open on erityisesti Euroopassa suosittu, CAN-protokollan päälle rakennettu ylemmän tason protokolla. CAN open sisältää OSI-verkkomallista täydellisesti ainoastaan sovelluskerroksen, mutta myös joitain komponentteja sovellus- ja data link -kerrosten välisistä kerroksista. CAN open ja CAN-protokolla muodostavat yhdessä valmiin sovelluskehyksen solmujen kommunikointiin hajautetussa ohjausjärjestelmässä.

CAN open määrittelee kommunikointiin käytettävät viestityypit, niiden viestitunnukset sekä sisällöt. Standardi koostuu kahdesta päätasosta. Kehystandardina toimii DS301 [2], joka määrittelee verkonhallintaviestit sekä muut kaikille väylän solmuille yhteiset viestityypit. Tällä varmistetaan peruskommunikoinnin toiminta ja yksinkertaistetaan laitetyyppikohtaisia laiteprofiileiksi kutsuttuja laitespesifikaatioita.

Laiteprofiili määrittelee millaisia viestejä esimerkiksi inklinometrimoduulin tulee vähintäänkin lähettää sekä vastaanottaa ja laitteen perustoiminnallisuuden, kuten esimerkiksi juuri inklinometrian turin tapauksessa resoluution konfiguroimisen. Laiteprofiileja on määritelty esimerkiksi inklinometreille, resolveille ja venttiiliohjaimille. Ne helpottavat huomattavasti järjestelmäsuunnittelua ja mahdollistavat ainakin periaatteessa minkä tahansa profiilin mukaisen moduulin

korvaamisen toisen valmistajan laiteprofiilin mukaisella tuotteella ilman uudelleenohjelmointia tai konfigurointeja.

Alla olevassa taulukossa Taulukko 2.2 on esitetty tärkeimmät CAN open -protokollan mukaiset viestit. NMT-viesteillä verkon master-solmu hallinnoi muita solmuja komentamalla esimerkiksi jokin tietty solmun konfigurointitilaan (preoperational) tai normaaliin käyttötilaan (operational). Heartbeat-viestillä yksittäinen solmu kertoo halukkaille toimintatilansa. Esimerkiksi toimilaitetta ohjaavan solmun on hyödyllistä tietää onko sille ohjausdataa lähettävä solmu normaalissa käyttötilassa.

Solmujen konfigurointiin käytetään SDO-viestejä (service data object). PDO-viesteissä kulkee normaalikäytönaikainen prosessidata kuten anturidata ja toimilaitteiden ohjauskomennot. Viestin CAN-ID koostuu NMT-viestiä lukuun ottamatta viestityyppikohtaisesta vakio-osasta sekä viestistä riippuen lähettävän tai vastaanottavan solmun ID:stä. Yksilöllisten solmutunnisteiden vaatimus merkitsee samalla sitä, että yhteen fyysiseen verkkoon kytkettyjen solmujen määrä on rajallinen. CAN open -protokollalla, vakio 11-bittistä viestitunnistekenttää käytettäessä solmutunnisteita on käytössä 127 kappaletta, joista tunnisteet 0 ja 127 on varattu erikoiskäyttöön. Yleensä solmutunnisteiden määrä on vähintäänkin riittävä.

Taulukko 2.2: Tärkeimmät CAN open -viestit

Viestityyppi	Viestin CAN-ID	Hyötydata-tavuja	Selitys
NMT	0x000	2	Verkonhallintaviesti
HEARTBEAT	0x700 + solmun ID	1	
txSDO	0x580 + solmun ID	8	Solmun vastaanottama konfigurointiviesti
rxSDO	0x600 + solmun ID	8	Solmun vastaus vastaanottamaansa konfigurointiviestiin
txPDO	0x180 + solmun ID	1-8	Solmun lähettämä prosessidata
rxPDO	0x200 + solmun ID	1-8	Solmun vastaanottama prosessidata

CAN open määrittelee myös solmulle eräänlaisen jaetun muistiavaruuden, johon toiset solmut voivat tehdä SDO-viesteillä luku- ja kirjoitusoperaatioita. Muistiavaruudesta käytetään yleisemmin nimeä objektitaulu. Objektitaulun muodostuu objekteista, joiden osoitteita kutsutaan indekseiksi. Yksittäinen objekti voi koostua 1-254:stä enintään 32-bittisestä datakentästä, joiden objektin sisäisiä osoitteita kutsutaan ali-indekseiksi (sub index). Objektien teoreettinen lukumäärä on 2^{16} eli 65536 kappaletta, mutta CAN open spesifikaation määrittelemät vakio-osoitealueet pienentävät enimmäismäärää huomattavasti.

Alla olevassa taulukossa Taulukko 2.3 nähdään Axiomatic Technologies Oy:n [4, s. 59.] inklinometrimoduulin identiteettiobjekti. Objektin indeksi on 0x1018 ja se koostuu

viidestä datakentästä, joista ensimmäinen ilmoittaa varsinaisten datakenttien lukumäärän eri suurimman ali-indeksin. Esimerkissä kaikkien datakenttien tietotyyppi on etumerkitön 32-bittinen luku (U32) ja kenttiin on ainoastaan lukuoikeudet (RO). Ali-indeksin 1 data kertoo, että moduulin valmistaja on Axiomatic Technologies Oy ali-indeksin 2 sisältäessä tuotekoodin. Ali-indeksistä 3 löytyy tuotteen versionumero ja viimeisestä ali-indeksistä sarjanumero.

Taulukko 2.3: Identiteettiobjektin rakenne

Indeksi	Ali-indeksi	Data-tyyppi	Oikeudet	Objektin nimi	Arvo	Selite
0x1018	0	U32	RO	Identity	4	
	1	U32	RO		0x55	Valmistajan tunnus
	2	U32	RO		0x2000	Tuotekoodi
	3	U32	RO			Versionumero
	4	U32	RO			Sarjanumero

CAN open -spesifikaation määrittelemä objektitaulun perusrakenne nähdään alla olevassa taulukossa Taulukko 2.4. Valmistajakohtaisille objekteille on varattu indeksit 0x2000 -0x5FFF, jolloin valmistajan omiin tarpeisiin jää vielä useimmiten riittävät 16383 objektaa.

Taulukko 2.4: DS301:n mukaiset objektitaulun alueet [2, s. 86.]

Indeksi	Selite
0x0000 - 0x0FFF	Varattu
0x1000 - 0x1FFF	Kommunikointiobjektit
0x2000 - 0x5FFF	Valmistajakohtaiset objektit
0x6000 - 0x67FF	Profilikohtaiset objektit
0x6800 - 0xAFFF	Varattu erikoiskäyttöön
0xB000 - 0xFFFF	Varattu

CAN open -spesifikaatio määrittelee tekstimuotoisen EDS-tiedostoformaatin solmun tukemien CAN open -viestien ja objektitaulun määrittelyyn. EDS-tiedoston avulla tiedot saadaan luettua nopeasti väylän konfigurointi- ja suunnittelutyökaluun ja edistyneempien master- solmujen tapauksessa jopa ajonaikaisesti suoraan ohjausjärjestelmään. Lisätietoa CAN- ja CAN open -protokollista löytyy standardoinnista vastaavan organisaation CIA:n kotisivuilta www.can-cia.org.

2.3.2. Käyttöliittymäpääte

Käyttöliittymäpääte on koneenohjausjärjestelmän sydän. Se toimii yleensä nimensä mukaisen tehtävän lisäksi myös järjestelmän keskusyksikkönä vastaten kinematiikkalaskennasta, mahdollisesta automatiikan ohjauksesta, diagnostiikasta,

tietoliikenteestä sekä CAN-väylän hallinnasta. Kuvassa Kuva 2.7 on tyypillinen käyttöliittymäpääte.



Kuva 2.7: Tyypillinen käyttöliittymäpääte

Tyypillisessä modernissa käyttöliittymäpääteessä on värillinen 10.4 – 12.1 tuumainen 600*800 pikselin resoluution kosketusnäyttö ja Intel Atom –tasoinen prosessori. Käyttöjärjestelmänä toimii useimmiten joko Windows CE tai yhä yleisimmin joku linux-distributio. Käyttöjärjestelmältä ei yleensä vaadita kovaa reaaliaikaisuutta edes silloin, kun paneeli hallitsee koneen työkalua ohjaavaa automaatiota.

Käyttöliittymäpaneeli liittyy koneenohjausjärjestelmän muihin komponentteihin yleensä CAN-väylällä. Usb-, ethernet- ja langattomat liittynät tarjoavat laajat mahdollisuudet kommunikoinnille, ohjelmistopäivityksille sekä erilaisille lisälaitteille kuten peruutuskameroille. Käyttäjäkokemuksen kannalta keskeisimpiä vaatimuksia ovat riittävä suorituskyky, tiedostojärjestelmän luotettavuus sekä näytön luettavuus myös kirkkaassa auringonpaisteessa ja riittävän nopea vaste matalissa käyttölämpötiloissa.

2.3.3. GNSS–vastaanotin ja GNSS RTK -tekniologia

GNSS-tekniologian kehitys 1990-luvun lopussa ja 2000-luvun alussa avasi työkonien koneenohjaukselle kokonaan uudet mahdollisuudet. Ensimmäistä kertaa liikkuvan työkonien paikka pystyttiin mittaamaan reaaliajassa kustannustehokkaasti ja ilman suurempia rajoituksia alle tuuman tarkkuudella myös korkeussuunnassa. Aiemmin vastaavaan ja parenpaankin mittaustarkkuuteen oli toki päästy, mutta huomattavasti kalliimman sekä raskas- ja vaikeakäyttöisemmän takymetritekniologian avulla. Siinä koneen paikkaa mitataan optisesti koneen ulkopuolella, kiinteällä paikalla sijaitsevalla takymetrillä, josta paikkatieto välitetään langattomasti työkoneseen. Takymetritekniikka mahdollistaa hyvin tarkan paikannuksen, mutta edellyttää suhteellisen hitaasti ja ennustettavasti kulkevaa työkonetta kuten esimerkiksi asfaltointikonetta sekä näköyhteyttä takymetrin ja työkonien välillä. Yksittäinen takymetri ei yleensä myöskään kykene seuraamaan kuin yhtä kohdetta kerrallaan.

Alla ovelassa taulukossa Taulukko 2.5 esitetään GNSS-vastaanottimen ja yksittäisen GNSS-satelliitin välisen etäisyysvirheen muodostuminen.

Taulukko 2.5: GNSS-vastaanottimen näkemä yksittäisen satelliitin etäisyysvirhe. [5, s.25.]

Virhelähde	Virhe
GNSS-satelliitin kellon epätahtisuus	± 2 m
Kiertoratavirhe	± 2.5 m
Ionosfääristä aiheutuvat virheet	± 5 m
Troposfäärin aiheuttamat virheet	± 0.5 m
Vastaanottimen kohina	± 0.3 m
Monitie-eteneminen	± 1.0 m
Kokonaisvirhe maksimissaan	± 11.3 m

Kuten taulukosta nähdään, suurimmat virhelähteet ovat ilmakehän eli signaalitien aiheuttamia. Ionosfääri on ilmakehän ylin, noin 50 kilometrin korkeuden yläpuolinen kerros, jonka ominaisuuksiin vaikuttaa erityisesti aurinko. Troposfääri on taasen ilmakehän alin kerros, joka yltyy maanpinnalta aina 10 - 15 kilometrin korkeuteen. Suurin osa ilmakehän sääilmiöistä tapahtuu troposfäärissä. Signaalitie virhelähteenä on luonteeltaan muuttuva, mikä tarkoittaa sitä, että liikkuvan GNSS- vastaanottimen on ilman ulkopuolista korjausdataa mahdotonta kompensoida siitä syntyvää virheitä. Tämä on luonut motivaation erilaisille differentiaali GNSS (DGPS tai DGNSS) -tekniikoille, joihin myös RTK GNSS lukeutuu. DGNSS-teknologiassa liikkuvan GNSS-vastaanottimen (englanninkielinen termi rover) lähistöllä on kiinteä tukiasemia (englanninkielinen termi base), joka laskee jatkuvasti paikkainformaation korjausdataa, jonka se lähettää liikkuvalla vastaanottimella yleensä joko GSM/GPRS-yhteyden tai UHF-radioyhteyden avulla. Jotta korjausdata olisi riittävänä laadukasta, tulee tukiaseman olla suhteellisen lähellä liikkuvan vastaanotinta. Käytännössä metrin tarkkuuteen pääsemiseksi perus DGNSS:llä etäisyys saa olla korkeintaan 10 - 15 kilometriä. Tätä tukiaseman ja liikkuvan vastaanottimen välistä etäisyyttä kutsutaan base line:ksi.

Perus DGNSS -järjestelmässä sekä tukiasemat että liikkuvat vastaanottimet vastaanottavat ainoastaan GNSS-satelliitin L1-kantoaallolla kulkevaa digitaalista karkeanavigointikoodia (CA, coarse navigation). RTK GNSS-järjestelmän perus DGNSS -järjestelmään nähden kertaluokkaa suurempi tarkkuus perustuu siihen, että RTK GNSS -järjestelmä hyödyntää myös L1-kantoaaltoa analogisena. Vielä lisätarkkuutta RTK GNSS -järjestelmään tuo uusimpien vastaanottimen L2-signaalituki,

mikä mahdollistaa entistä tarkemman korjausdatan muun muassa monitie-etenemisen vaikutuksen kompensoimiseksi. Kantoaallon hyödyntäminen edellyttää perusnavigaattoritasen GNSS-vastaanotinta huomattavasti laadukkaampaa laitteistoa ja monimutkaisempaa ohjelmistoa, mikä selittää osaltaan RTK GNSS -järjestelmien normaaleihin kuluttajavastaanottimiin nähden huomattavan korkean hinnan ja koon.

DGNSS-järjestelmissä on käytössä kaksi tapaa tuottaa ja välittää korjausdataa liikkuvalle vastaanottimelle. Ensimmäisenä käyttöön otettu tapa on käyttää kiinteää, maksimissaan noin kymmenen kilometrin etäisyydelle asennettua vastaanotinta tukiasemana, joka lähettää korjausdatan yleensä yksisuuntaisella UHF-radiolla liikkuvalle vastaanottimelle tai vastaanottimille. Ratkaisun etuja ovat tukiaseman läheisyyden ansioista hyvä tarkkuus, mutta haittapuolina yleensä oman tukiaseman korkea hankinta- ja ylläpitokustannus sekä melko rajoitettu toimintasäde, mikäli käytössä ole useampia tukiasemia. Lisäksi korjaussignaalin tarkkuus vaihtelee tukiaseman ja liikkuvan vastaanottimen välisen etäisyyden funktiona.

Vaihtoehtoinen ja yleistynyt tapa on virtuaalitukiasemapalvelu, jota yleisemmin kutsutaan VRS-verkoksi, käyttäminen. VRS-verkossa on tietyllä alueella, kuten esimerkiksi Suomen tapauksessa koko maan laajuudella, tasaisin välein hajasijoitettuna kiinteitä tukiasemia. Tukiasemat lähettävät jatkuvasti korjaamatonta paikkaratkaisuaan laskentakeskukseen, johon myös liikkuvat GNSS-vastaanottimet ovat jatkuvassa datayhteydessä, tavallisesti kaksisuuntaisella GSM/GPRS-yhteydellä. Tukiasemien tavoin myös liikkuva vastaanotin lähettää laskentakeskukselle paikkaratkaisuaan, jonka perusteella keskus valitsee lähimmät kiinteät tukiasemat interpoloidakseen liikkuvan vastaanottimen viereen virtuaalisen tukiaseman, jonka korjausdataa keskus lähettää sitten liikkuvalle vastaanottimelle.

Ratkaisulla on monta merkittävää etua perinteiseen paikallisen tukiaseman käyttöön nähden. VRS-tekniikka vapauttaa käyttäjän työmaakohtaisien tukiasemien ylläpidosta sekä tukiaseman hankintakuluista, mikä on merkittävä etu etenkin pienillä ja taajaan vaihtuvilla työmailla toimittaessa sekä niin sanotuille yhden miehen yrityksille. VRS-verkon avulla työkone vapautuu myös kiinteän tukiaseman enimmäisetäisyysrajoituksesta sekä tukiaseman ja liikkuvan työkoneen etäisyyden mukaan muuttuvasta paikannusratkaisun tarkkuudesta.

GNNS-paikannuksen tulevaisuus näyttää valoisalta. GPS- ja GLONASS-satelliittien rinnalle saadaan todennäköisesti muutaman vuoden kuluessa eurooppalaisten hallinnoima Galileo-järjestelmä, mikä lisää huomattavasti GNNS-paikannuksen luotettavuutta, saatavuutta ja tarkkuutta etenkin Suomen leveysasteilla. Teknologian kehitys sekä suosion kasvu alentavat myös tarkkojen vastaanottimien hankintahintaa, minkä ansiosta GNSS-teknologiaa voidaan hyödyntää yhä laajemmin ja yksinkertaisemmissa työkoneissa. GNSS- teknologiasta löytyy lisätieto muun muassa

tarkkuusvastaanottimien valmistajien Novatelin (www.novatel.ca) sekä Trimblen (www.trimble.com) kotisivuilta.



Kuva 2.8: RTK GNSS -konevastaanotin

Kuvassa Kuva 2.8 nähdään esimerkki koneenohjausjärjestelmän työkoneeseen tarkoitettu RTK GNSS -vastaanottimesta. Laitteen yläosasta löytyy liittimet kahdelle GNSS-antennille, UHF- sekä GSM/GPRS- antennille.

2.3.4. Inklinometri- eli kallistusanturit

Inklinometria eli kallistusanturia käytetään koneenohjauksessa työkonen nivellettyjen osien sekä työkonen rungon asennon havainnointiin. Kaivinkoneessa puomiston osalta inklinometrit voidaan korvata lineaari- ja resolveriantureilla, mutta vähintäänkin koneen rungon asennon seuraamiseen inklinometri on välttämätön.

Inklinometrin toteutustapoja on useita. Toteutustavasta riippumatta anturit ovat absoluuttiantureita eli ne antavat oikean mittauksen välittömästi käynnistymisen jälkeen ilman niin kutsutussa kotipisteessä eli kiinteässä referenssipisteessä käymistä.

Alkeellisimmat inklinometriananturit perustuvat nestepinnan asennon seuraamiseen kapasitiivisesti tai resistiivisesti. Teknologian suurimpia ongelmia ovat hidas vaste ja nestepinnan luontainen värinäherkkyys. Häiriöherkkyys vielä korostuu työkonerympäristössä, jonka luonteeseen kuuluu värinät, joidenka liikenopeudet ja taajuudet menevät osittain päällekkäin normaalin työskentelyn liikenopeuksien kanssa. Tästä aiheutuu luonnollisesti jonkin asteisia ongelmia kaikissa kiihtyvyyssmittausta hyödyntävissä mittausmenetelmissä.

Neuvovassa koneenohjauksessa käytettävyyden edellytyksenä on työkalun ja työkonen liikenopeudesta riippuen enintään 100- 300 millisekunnin kuljettajan kokema kokonaisviive. Työkalua edes osittain automaattisesti ohjaava koneenohjausjärjestelmä vaatii kunnolla toimiakseen yleensä vielä lyhyempää viivettä. Edistyksellisillä,

järjestelmän kokonaisviipeet huomioivilla säätäjillä maksimiviivevaatimusta voidaan kylläkin yleensä hieman keventää.

Nykyään yleisesti käytetyt ja ominaisuuksiltaan toimivimmat anturielementit mittaavat putoamiskiihtyvyyttä (g) mems-teknologiaan perustuvalla kiihtyvyysanturilla, jonka mittausalue on sovitettu asennontunnisteluun eli ± 1 g:n alueelle. Mems-kiihtyvyysanturielementissä on usein mikrometrikokoluokan mekaaninen osa, jonka geometria tai asento muuttuu sen mukaan mikä elementin asento on suhteessa kiihtyvyyteen eli ideaalitapauksessa maan vetovoiman aiheuttamaan putoamiskiihtyvyyteen. Muutos havaitaan tyypillisesti elementin kapasitanssin muutoksena. Anturielementti muuntaa kapasitanssin yleensä jännitteeksi, joka annetaan ulos joko digitaalisena esimerkiksi SPI-liittymän avulla tai analogisena jännitesignaalina. Jännitesignaali muunnetaan kulmaksi α alla olevalla kaavalla (1), missä V_{out} on anturin antojännite ja V_{offset} anturin nollakulmaa vastaava ulostulojännite [6, s. 3.].

$$\alpha = \arcsin ((V_{out} - V_{offset}) / \text{herkkyys}) \quad (1)$$

Mems-teknologian etuina nestepinta-antureihin ovat pienemmät viipeet ja häiriöherkkyys kiihtyvyyksille, häiriöiden nopeampi vaimeneminen, parempi resoluutio sekä absoluuttinen tarkkuus ja anturielementin pienempi koko.

Inklinometrimoduuleita on yhden ja kahden suunnan malleja. Kahden suunnan moduuli mittaa asentonsa kahden akselin suhteen yhden suunnan mallin pystyessä vain yhden akselin suhteen tapahtuvan kallistuksen havainnointiin. Kaivinkoneessa yhden suunnan malleja voidaan käyttää pää- ja taittopuomissa, joilla on vain yksi autonominen liikesuunta koneen koordinaatissa, eli kohtisuora kiertokulma Y-akselin suhteen. Kuva 2.1 selventää mistä kulmasta on kyse. Pää- ja taittopuomien muut liikkeet seuraavat kaivinkoneen rungon liikkeitä.

Kaivinkoneen rungon asennon mittaamiseen tarvitaan kahden suunnan inklinometriananturi. Tätä anturia kutsutaan runkoanturiksi. Runkoanturi asennetaan siten, että sen mittausakselit ovat mahdollisimman tarkasti koneen koordinaatiston X- ja Y-akselien suuntaiset. Mikäli näin ei menetellä, tulee kinematiikkalaskentaan virheitä. Mikäli työkalu on varustettu sivuttaiskallistimella, on sekin koneen rungon tavoin anturoitava kahden suunnan anturilla.

Puomisto- ja työkaluanturin mittausalue on tyypillisesti 0...359.99 astetta. Runkoanturin mittausalue voi olla huomattavasti suppeampikin. Yleensä käytetään yksinkertaisuuden vuoksi ± 90 asteen malleja, mutta suurimpaan tarkkuuteen päästään antureilla, joidenka mittausalue on optimoitu ± 30 asteeseen.

Inklinometriananturimoduulien resoluutio on tyypillisesti 0.01 astetta. Absoluutisissa tarkkuuksissa on suuria vaihteluja johtuen siitä, että anturielementin tarkkuuteen

vaikuttaa hyvinkin moni tekijä. Kaikki inklinometrianturimoduulien valmistajat eivät huomio näitä tekijöitä vaan ilmoittavat tyypillisesti tarkkuuden ainoastaan melko ideaaleissa olosuhteissa jättäen monesti jopa olosuhteiden tarkan määrittelyn tyystin pois datalehdistään. Tyypillisesti absoluuttiseksi tarkkuudeksi ilmoitetaan $\pm 0.1 \dots \pm 0.3$ astetta vakioilämpötilassa.

Kaivinkoneen 2D- koneenohjausjärjestelmässä työkalun maksimikorkovirhe (Z_{TKV}), joka aiheutuu kaivinkoneen runkoanturin antaman Y-akselin kiertokulman virheestä YV , saadaan yksinkertaisella trigonometrisella kaavalla (2), missä L_{pp} on pääpuomin pituus ja L_{tp} taittopuomin pituus.

$$Z_{TKV} = (L_{pp} + L_{tp}) \sin(YV) \quad (2)$$

Kulmavirheen YV ollessa 0.1 astetta, pääpuomin pituuden 4 metriä ja taittopuomin 6 metriä saadaan työkalun maksimikorkovirheeksi Z_{TKV} 1.74 senttimetriä puomiston ollessa täysin ojennettuna. Tästä nähdään, että inklinometriantureiden sekä niiden asennuksen ja asennuskalibroinnin laadulla on suuri merkitys koneenohjausjärjestelmän kokonaistarkkuuteen.

MEMS-pohjaisten inklinometriantureiden heikkouksia kaivinkoneen koneenohjausjärjestelmässä ovat herkkyys mittausakselien suuntaisille häiriökiiihtyvyyksille ja keskeiskiihtyvyydelle sekä herkkyys ei-mittausakselin suuntaisille kallistuksille (cross axis sensitivity).



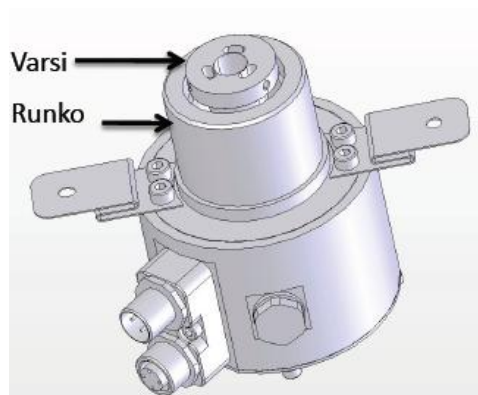
Kuva 2.9: Koneenohjaukseen soveltuva inklinometrianturi

Kuvassa Kuva 2.9 nähdään tyypillinen koneenohjauskäyttöön suunniteltu inklinometrianturi. Anturi on koteloitu työkonerympäristön rasituksia kestäväan koteloon ja asennusasento on hienosäädettävissä kotelon pitkulaisilla kiinnitysrei'illä.

2.3.5. Lineaarianturit ja resolverit

Puomit voidaan paikantaa inklinometrin sijaan myös nivelpisteisiin asennettavilla resolveureilla sekä hydraulisyntereiden sisään tai rinnalle asennettavilla lineaariantureilla. Kuvassa Kuva 2.10 nähdään resolverianturi ja kuvassa Kuva 2.11

lineaarianturi. Molemmat anturit pohjautuvat sähkömagnetismiin ja ovat luonteeltaan absoluuttiantureita, eli antavat oikean mittau tuloksen heti käynnistyttyään.



Kuva 2.10: Nivelen päähän asennettava resolveri

Resolveria voidaan luonnehtia pyöriväksi muuntajaksi. Pyörivässä osassa eli varressa olevaan käämiin indusoidaan vakio AC- referenssijännite, joka taas indusoi resolverin paikallaan pysyvän rungon kahteen mittauskäämiin varren kiertokulmasta verrannolliset jännitteet. Mittaamalla mittauskäämin jännitteitä saadaan selville resolverin varren asento suhteessa resolverin runkoon tyypillisesti 0.05 asteen tarkkuudella.



Kuva 2.11: Tempsonic:n hydraulisylinterin rinnalle asennettavaksi sopiva lineaarianturi

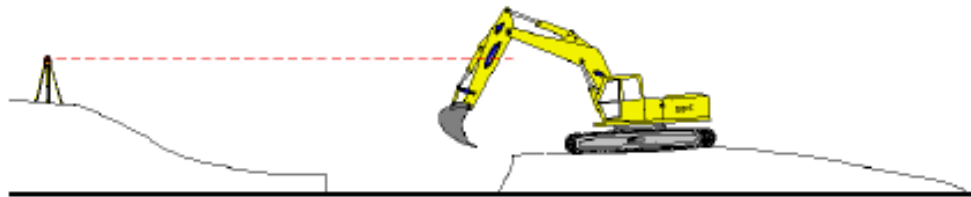
Lineaarianturi perustuu yleensä magnetoresistiiviseen lineaarilementtiin, jonka välittömässä läheisyydessä liikkuu mitattavan kohteen mukana liikkuva kestopagneetti. Lineaarielementti muodostaa aaltoputken, johon synnytetään vakionopeudella etenevä ääniaalto lyhyen virtapulssin avulla. Kestomagneetti muuttaa lineaarilementin ominaisuuksia täsmälleen ja ainoastaan magneetin sijaintikohdalta niin, että ääniaalto kimpoaa pisteestä takaisin tulosuuntaansa. Ääniaallon kulkuajan mittauksella saadaan

selville kestmagneetin paikka esimerkiksi 7 metrin mittausetäisyydeltä tyypillisesti 2 mikrometrin resoluutiolla ja vähintään millimetrin tarkkuudella.

Molempien anturityyppien etuja ovat luotettavuus, epäherkkyys värinöille ja lämpötilavaihteluille, olematon mittaussviive ja satojen hertsien mittaustaajuus. Kummatkin anturityypit ovat myös erinomaisen tarkkoja, vaikkakin käytännön tarkkuus sovelluksessa onkin hyvin riippuvainen asennuksen sekä tarvittavan apumekaniikan laadusta. Mikäli resolverit ja lineaarianturit eivät olisi niin hankalia jälkiasentaa työkonseihin, olisivat ne erinomaisia antureita liikkuvan puomiston anturointiin.

2.3.6. Laservastaanottimet

Laservastaanottimen avulla koneenohjausjärjestelmä kiinnittyy työmaalla toimivan tasolaserin antamaan korkoreferenssiin. Tasolaserin antamaa referenssiä käytetään monesti 2D- ja kevennetyssä 3D -koneenohjausjärjestelmissä. Laservastaanotin asennetaan kaivinkoneessa yleensä taittopuomiin. Kaivinkoneen tapauksessa vastaanottimen käyttö on melko yksinkertaista, vaikka maastossa olisi huomattaviakin korkeusvaihteluja puomiston toimiessa eräänlaisena säätäväkorkoisena mastona.



Kuva 2.12: Tasolaserin käyttö koneenohjauksessa korkoreferenssinä

Yllä olevassa kuvassa Kuva 2.12 nähdään tasolaserkorkoreferenssijärjestelmän toimintaperiaate. Lasersäde osuu juuri taittopuomiin asennettuun laservastaanottimeen. Tasolaserkorkoreferenssijärjestelmän toimintasäde riippuu luonnollisesti sekä lähettimen että vastaanottimen ominaisuuksista, mutta tyypillisesti päästään 200 metrin toimintaetäisyyteen.

2.3.7. Venttiiliohjaimet

Venttiiliohjaimia käytetään ohjaamaan työkonen työkalua silloin, kun koneenohjausjärjestelmä tukee kuljettajan työtaakkaa keventävää automatiikkaa. Kaivinkoneen tapauksessa kyse on tällöin yleensä kauhan sivuttaiskallistimen ohjaamisesta, kun taas yksinkertaisempaa työsuoritetta tekevissä työkonseissa kuten puskutraktorissa järjestelmä voi ohjata työkalun hydraulikkaa kokonaisuudessaan eli puskukoneen tapauksessa puskulevyn kaikkia liikkeitä. Automatiikan aktivoituessa venttiiliohjaimella käännetään ensin koneen oman kyseisen liikkeen

hydrauliikkakontrollilinjaa virtaus kulkemaan hydraulinestetankkiin, liikkeen synnyttävän sylinterin ohi, jolloin sylinterin hallinta siirtyy koneenohjausjärjestelmälle.

Venttiiliohjaimissa on yleensä sekä on-off-tyyppisiä sekä proportionaaliventtiililähtöjä. On-off-lähdöillä ohjataan työkoneen oman hydraulikan katkaisuventtiileitä ja proportionaalilähdöillä varsinaisia työkalun liikkeitä.

Venttiiliohjaimen lähtö on tyypiltään virtalähtö. Virralla liikutetaan hydrauliiventiilin esiohjauskaraa ohjaavaa solenoidia. On-off-lähtö ohjaa nimensä mukaisesti solenoidin ja sitä kautta hydrauliiventiilin joko täysin auki tai kiinni proportionaalilähdön hallitessa solenoidin liikettä portaattomasti, jolloin myös sylinterin liikenopeutta pystytään hallitsemaan muutenkin kun säätämällä hydraulijärjestelmän painetta pumpun tuottoa tai mootturin kierroslukua muuttamalla.

2.4. Kaivinkoneen kinematiikkalaskenta ja suuntimavirhe

Kaivonkoneen kinematiikkalaskenta perustuu perustrigonometriaan. Kun puomin pituus ja kulma tunnetaan, voidaan puomin päänn koordinaatit laskea yksinkertaisilla peruskaavoilla. Esimerkiksi puomin päänn korkokoordinaatti Z_{pl} suhteessa puomin alkuun, saadaan kaavalla (3), missä L_p on puomin pituus ja α inklinometrianturin antama puomin asento suhteessa maan tasoon.

$$Z_{pl} = (L_p) \sin (\alpha) \quad (3)$$

Etäisyyskoordinaatti X_{pl} saadaan kaavalla (4).

$$X_{pl} = (L_p) \cos (\alpha) \quad (4)$$

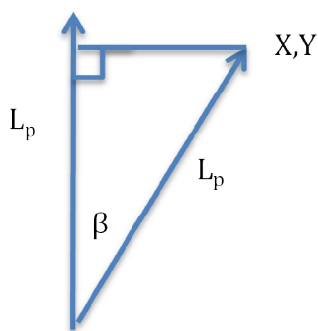
Koneen rungon sivuttaiskallistuman vaikutusta ei edellisessä esimerkeissä huomioida.

Työkoneen rungon ollessa täysin vaaitettu saadaan suuntimavirheen β tuottama työkalun etäisyysvirhe X_{err} kaavalla (5) ja sivuttaisvirhe Y_{err} kaavalla (6). L_p on nyt puomiston kokonaispituus.

$$X_{err} = L_p - (L_p) \cos (\beta) \quad (5)$$

$$Y_{err} = 0 - (L_p) \sin (\beta) \quad (6)$$

Laskukaavaa selventää alla oleva kuva Kuva 2.13.



Kuva 2.13: Suuntimavirhe

Puomiston ollessa ojennettuna 10 metrin pituuteen tuottaa 0.5 asteen suuntimavirhe kavinkoneen koneenohjauskäytössä merkityksettömän 0.03 senttimetrin etäisyysvirheen, mutta jo 8.7 senttimetrin sivuttaisvirheen. 10 prosentin (10 metrin matkalla korkeus muuttuu metrin) poikittaisluiskaa kaivettaessa tämä johtaa noin 0.87 senttimetrin korkovirheeseen. Korkovirhe kasvaa lineaarisesti luiskan jyrkkyyden suhteen.

2.5. Suuntima-anturi

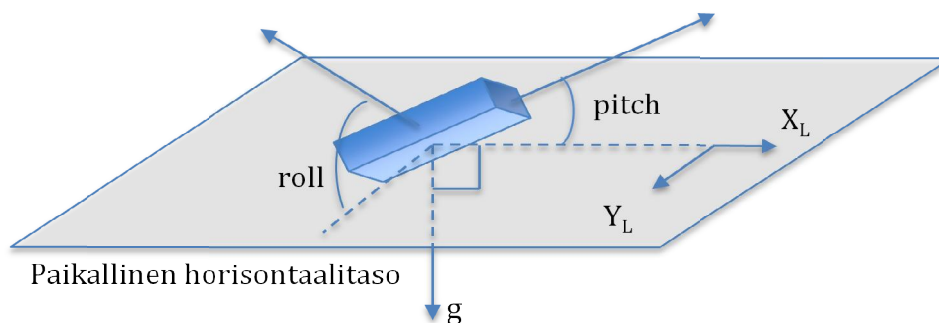
Suuntima-anturin päätoteutusvaihtoehtoja on kolme. Yksinkertaisin vaihtoehto on maan magneettikenttää mittaava sähköinen kompassi. Toinen vaihtoehto GNSS-teknologian käyttäminen ja kolmas inertianavigointimoduuli (INS).

2.5.1. Sähköinen kompassi

Kompassin toiminta perustuu maan magneettikentän mittaamiseen. Maan magneettikentän voimakkuus on noin 0.6 gaussia kenttäviivojen kulkiessa magneettiselta etelänavalta magneettiselle pohjoisnavalle. Päiväntasaajan tasalla kenttä on horisontaalinen, mutta mitä lähemmäs mennään magneettisia napoja, sitä enemmän kenttä kääntyy vertikaaliseksi siten, että napojen kohdalla kentän horisontaalinen komponentti katoaa lopulta käytännössä kokonaan. Magneettikentän kallistuskulmaa kutsutaan dip-kulmaksi.

Suuntimalla tarkoitetaan kappaleen horisontaalisen eli maan gravitaatiokenttään nähden kohtisuorassa olevan koordinaatiston suuntaa suhteessa todelliseen maantieteelliseen pohjoisnapaan. Tässä työssä tarkastellaan vastedes kuitenkin suuntimaa suhteessa magneettiseen pohjoisnapaan, ellei toisin mainita. Suuntima on 0 astetta paikalliskoordinaatiston osoittaessa tarkalleen kohti pohjoisnapaa, mistä kulma kasvaa myötäpäivään käännettäessä niin, että idän kohdalla suuntima on tasan 90

astetta, etelän 180 ja lännen 270 astetta. Kuvassa Kuva 2.14 nähdään kappaleen paikalliskoordinaatisto, jonka akselit ovat X_L ja Y_L . Akseli X_L on kappaleen suuntiman kanssa yhdensuuntainen.

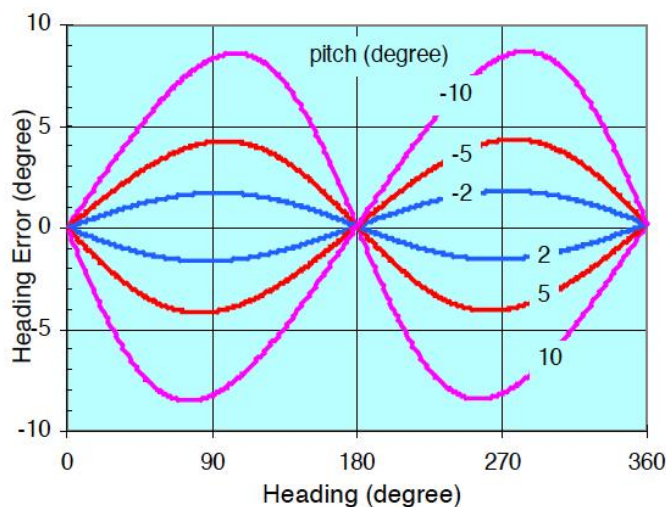


Kuva 2.14: Kompassin horisontaalinen paikalliskoordinaatisto

Kappaleen kallistuskulmia suhteessa horisontaalitasoon kutsutaan roll- ja pitch-kulmiksi. Roll-kulma kuvaa kiertoa X-akselin suhteen eli sivuttaiskallistusta. Pitch-kulma määrittelee pitkittäissuuntaisen eli Y-akselin suhteen tapahtuvan kallistuksen. Mikäli pitch- ja roll-kulmat ovat nolla astetta eli kappale on tarkalleen horisontaalitasossa, saadaan suuntima selville yksinkertaisimmalla eli kaksiakselisella kompassianturilla. Kaksiakselisessa kompassianturissa on kaksi toisiinsa nähden kohtisuorassa kulmassa olevaa magneettikentän voimakkuutta mittaavaa anturielementtiä X ja Y. X-elementin mittausakseli on täsmälleen anturin paikalliskoordinaatiston X-akselin suuntainen Y-elementin ollessa Y-akselin suuntainen. Näin ollen elementit mittaavat magneettikentän kompassin paikalliskoordinaatiston mukaiset komponentit M_{xh} ja M_{yh} . Vallitseva suuntima β saadaan kaavalla (7).

$$\beta = \arctan(M_{yh} / M_{xh}) \quad (7)$$

Jotta edellisellä kaavalla saatu suuntima olisi oikea, täytyy kompassin olla horisontaalitasossa eli pitch- ja roll-kulmien pitää olla nolla astetta. Mikäli näin ei ole, syntyy suuntimaan virhettä kuvan Kuva 2.15 mukaisesti. Jo kahden asteen kallistus riittää aiheuttamaan noin kahden asteen suuntimavirheen magneettikentän dip-kulma ollessa 40 astetta.



Kuva 2.15: Pitkittäiskallistuksen aiheuttama suuntimavirhe 40 asteen dip-kulmalla [7, s.3.].

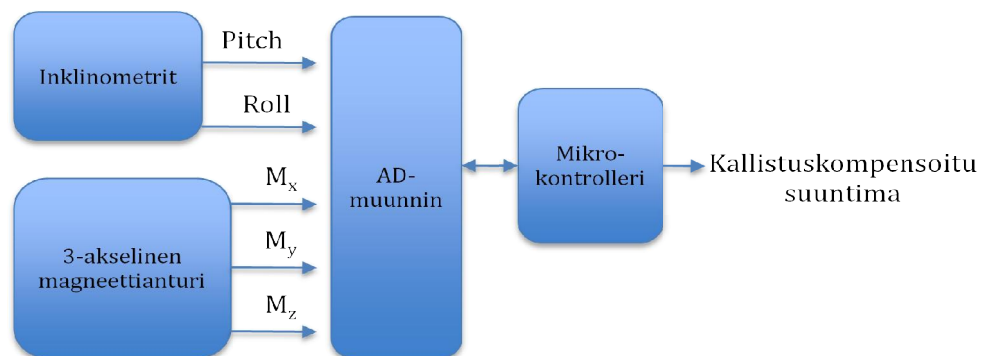
Edellisen perusteella on ilmeistä, että pitch- ja roll-kallistukset on kompensoitava, jos suuntimasta halutaan tarkka. Yksikertaisin kompensointitapa on sijoittaa kompassi telineeseen, joka vaaittaa itsensä automaattisesti horisontaalitasoon. Toimintaperiaate on tällöin sama kun tavallisessa suunnistuskompassissa. Mekaanisen vaaituksen haittapuolia ovat värinäherkkyys ja ainakin kannettaviin elektroniikkalaitteisiin sopimattoman suuri koko. Lisäksi se, että kompassi ei pysy paikoillaan suhteessa asennusalustansa kuten kaivinkoneeseen, tekee käytännössä mahdottomaksi kompensoida asennusalustan aiheuttamia staattisiakaan magneettisia anomalioita. 2-akselisella kompassilla on myös hankala havaita magneettikentän häiriöitä, koska kentän kokonaisvoimakkuutta ei voida mitata kolmannen eli Z-suunnan elementin puuttuessa.

Mekaanisen vaaituksen rajoitteet ratkeavat sähköisellä vaaituksella. Sen toteuttamiseen tarvitaan pitch- ja roll-kallistuskulmien seuraamiseen inklinometrian turit sekä magneettikentän Z-suuntaista komponenttia mittaava magneettianturi. Uudet, pitch- ja roll-kallistukset huomioivat, magneettikentän horisontaalitasoon komponentit M_{yh} ja M_{xh} saadaan kaavoilla (8) ja (9), joissa M_x on horisontaalitasoon X-akselin suuntaisen magneettianturin mittaama magneettikenttä, M_y Y-akselin ja M_z Z-akselin suuntainen komponentti. Suuntima saadaan selville kaksiakselisen kompassin tapaan kaavalla (7). [7, s. 2.]

$$M_{yh} = M_x \cos(\text{pitch}) + M_y \sin(\text{roll}) \sin(\text{pitch}) - M_z \cos(\text{roll}) \sin(\text{pitch}) \quad (8)$$

$$M_{xh} = M_y \cos(\text{roll}) + M_z \sin(\text{roll}) \quad (9)$$

Alla olevan kuvan Kuva 2.16 lohkokaaviossa on esitetty yhteenvedona sähköisesti kallistuskompensoidun kompassin lohkokaavio keskeisimpien komponenttien osalta.



Kuva 2.16: Sähköisesti kallistuskompensoidun kompassin lohkokaavio

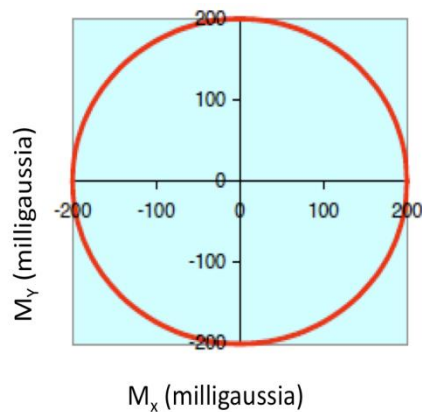
Sähköisen kompassin keskeisimmät virhelähteet ovat:

- Pitch- ja roll-kallistuksista johtuvat virheet
- Analogiasignaalin epäideaalisuudet
- Magneettianturielementtien epäideaalisuudet
- Maan magneettikentän anomaliat
- Asennusalueen sekä ympäristön staattiset ja muuttuvat magneettiset häiriöt

Kallistuksista johtuvia häiriöitä käsiteltiin kompensoimattoman kaksiakselisen kompassin yhteydessä. Signaalien epäideaalisuuksia käsitellään tarkemmin suuntima-anturimoduulin toteutusta käsittelevässä kappaleessa 3. Magneettianturielementistä johtuvia virheitä käsitellään kappaleessa 2.5.4.

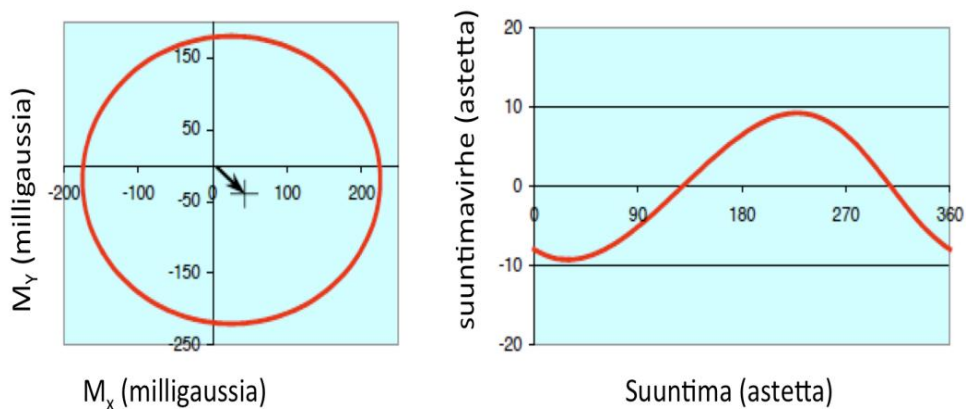
Maan magneettikentän voimakkuus ja suunta eivät ole tarkalleen ottaen täysin vakioita kaikkialla maapallolla. Poikkeavuuksia kutsutaan yleisesti anomaliaiksi. Suunnistuskäytössä anomaliat voivat olla merkittävä epävarmuustekijä, mutta kerrallaan hyvin rajatulla alueella toimivassa suuntima-anturisovelluksessa ongelma ei ole niin merkittävä.

Kompassin asennusalueesta sekä lähiympäristö aiheuttavat yleensä häiriöitä magneettikenttään. Oman magneettikentän luovat kappaleet kuten esimerkiksi kestopäälle tai sähkömoottorit vääristävät kenttää hard iron-vaihtuksen kautta. Magneettianturi havaitsee häiriön magneettikentän resultanttikentän voimakkuuden muutoksena. Kuvassa Kuva 2.17 nähdään X- ja Y-suuntiin mitattavien magneettianturien mitaama kentän voimakkuus (M_x , M_y) pyöryttäessä kompassia 360 astetta horisontaalitasossa häiriöttömässä magneettikentässä. Yhdistämällä M_x ja M_y -parit saadaan kuvaajaksi häiriöttömässä kentässä täydellinen ympyrä, jonka keskipiste on origossa edellyttäen, että anturielementtien ja signaaliteiden offsetteja ei ole tai ne on poistettu kalibroinnilla.



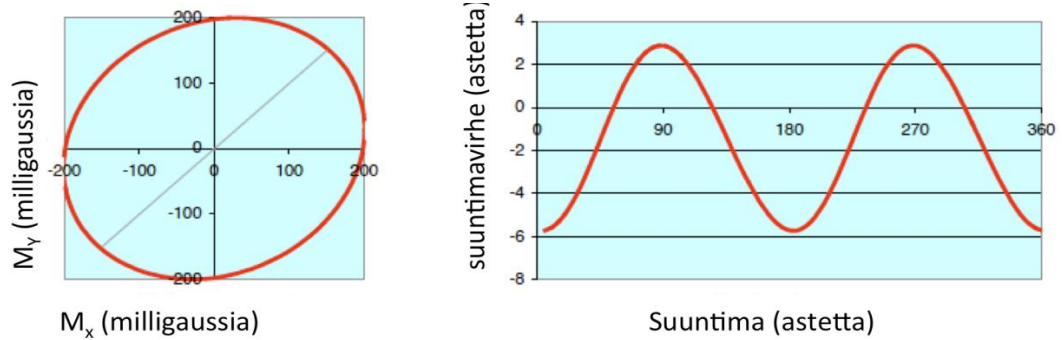
Kuva 2.17: Kompassin 360 asteen pyörähdys häiriöttömässä horisontaalitasossa [7, s. 5.].

Hard iron -ilmiö siirtää ympyrän keskipisteen pois origosta kuten kuvan Kuva 2.18 vasemman puoleisessa kuvaajassa nähdään. Suuntimavirhe–suuntima-kuvaajalla virhe näkyy 360 asteen pyörähdyksessä yhtenä sinikäyränä, mistä syystä virhettä kutsutaan yksisykliseksi.



Kuva 2.18: Kompassin 360 asteen pyörähdys horisontaalitasossa hard iron -ilmiön häiritsemässä kentässä [7, s.6.].

Soft iron -ilmiö aiheutuu materiaalista, jolla ei ole omaa magneettikenttää, mutta joka kuitenkin vaikuttaa ympäröivään magneettikenttään. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi nikkeli. Ilmiö näkyy M_x , M_y -kuvaajassa ympyrän ellipsoitumisena kuten kuvassa Kuva 2.19 nähdään. Oikeanpuolisesta kuvaajasta ilmenee, että suuntimavirhe on kaksisyklinen, mikä ilmenee kahtena täydellisenä siniaaltona yhdessä 360 asteen kierroksessa.



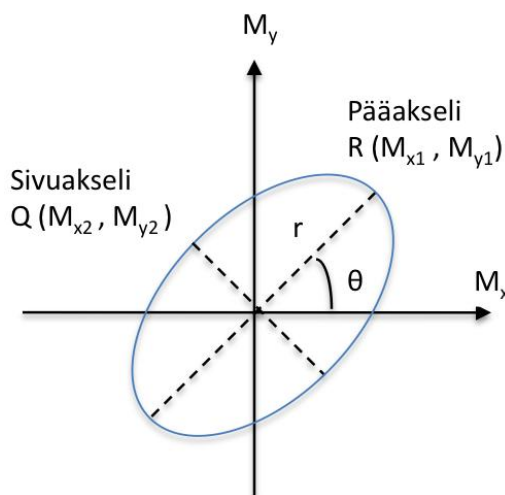
Kuva 2.19: Kompassin 360 asteen pyörähdys horisontaalitasossa soft iron -ilmiön häiritsemässä kentässä [7, s.6.].

Hard iron -ilmiön kompensoiminen on melko helppoa, mikäli suuntima-anturi asennusalustoihin voidaan pyöräyttää paikoillaan vähintään 360 asteen kierros täydellisessä horisontaalitasossa. Kierroksen aikana mitatuista M_x , M_y -pareista etsitään akseleiden minimi- (M_{x-min} , M_{y-min}) ja maksimiarvot (M_{x-max} , M_{y-max}) joiden avulla voidaan helposti laskea offsetit O_x ja O_y kaavoilla (10) ja (11). [8]

$$O_x = (M_{x-max} + M_{x-min}) / 2 \quad (10)$$

$$O_y = (M_{y-max} + M_{y-min}) / 2 \quad (11)$$

Soft iron -ilmiön kompensoiminen on hieman mutkikkaampaa. Alla olevaan kompassin pyörähdyskuvaajaan on merkitty syntyneen ellipsin pää- ja sivuakselit, niiden maksimien ja minimien koordinaatit sekä ellipsin kallistuskulma θ .



Kuva 2.20: soft iron -vaikutuksen synnyttämä ellipsi. Hard iron -häiriöt ja offsetit on poistettu.

Ensimmäiseksi selvitetään pääakselin pituus r kaavalla (12) ja sen avulla kallistuskulma θ kaavalla (13).

$$r = \sqrt{(M_{xI})^2 + (M_{yI})^2} \quad (12)$$

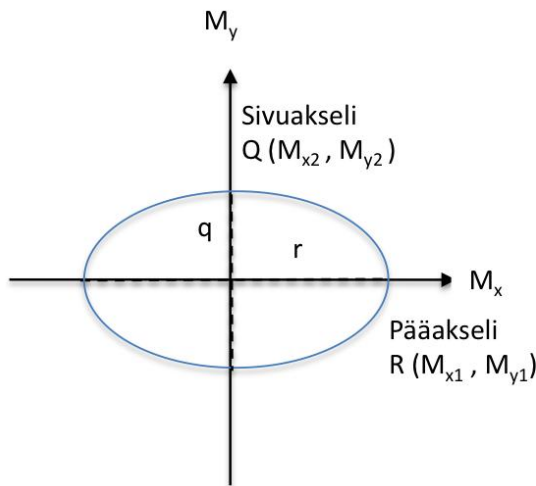
$$\theta = \arcsin(M_{yI} / r) \quad (13)$$

Tämän jälkeen rakennetaan rotaatiomatriisi R kaavalla (14), jolla ellipsin pääakseli käännetään X-akselin suuntaiseksi kaavan (15) avulla, missä v on alkuperäiset dataparit ja v_I kaavalla (15) saatavat uudet dataparit.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$v_I = Rv \quad (15)$$

Kuvassa Kuva 2.21 on tuloksena saatu ellipsi, jonka akselit ovat koordinaatiston akseleiden suuntaiset.



Kuva 2.21: Rotaatiomatriisin avulla käännetty ellipsi

Tämän jälkeen akseleiden suhteesta saadaan helposti laskettua korjauskerroin k kaavalla (16). [8]

$$k = q/r \quad (16)$$

On kuitenkin huomioitava, että sekä soft iron -, että hard iron -kompensointikalibroinnit on uusittava aina ympäristön tai asennusalustan magneettisten

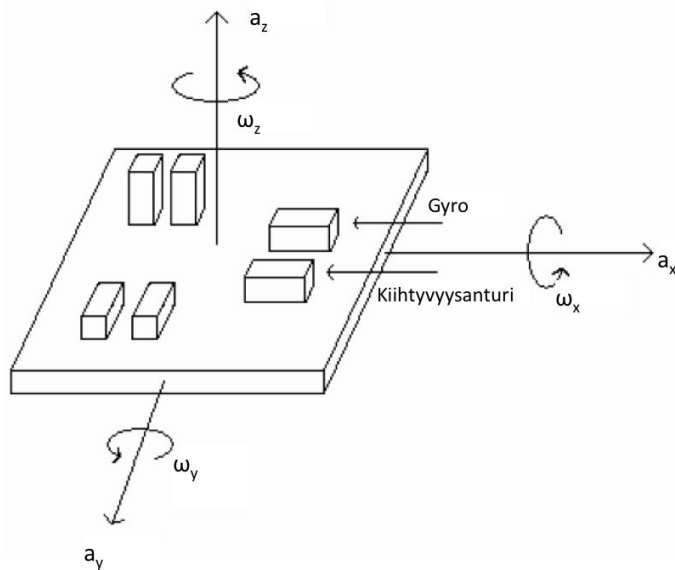
ominaisuuksien muuttuessa eivätkä ne pysty kompensoimaan esimerkiksi ohiaajan ajoneuvon aiheuttamia häiriöitä.

2.5.2. GNSS suuntima-anturina

Suuntima-anturi voidaan toteuttaa myös yksi- tai kaksiantennillisella GNSS-vastaanottimella kuten kappaleessa 2.3.3 jo esitettiin. Toteutuksen haittapuolia ovat kalleus sekä alttius GNSS-järjestelmän ominaisongelmille, joita myös käsiteltiin kappaleessa 2.3.3.

2.5.3. Inertiaalinelavigointimoduuli

Inertiaalinelavigointimoduuli seuraa kappaleen paikkaa liikenopecta ja -suuntaa sekä orientaatiota mittaavien antureiden avulla. Peruskokoonpanossa moduuli koostuu kolmesta kiihtyvyyssanturista sekä kolmesta gyroskoopista. Anturit on asennettu niin, että niiden mittausakselit ovat yhtenevät seurattavan kappaleen paikalliskoordinaatiston akselien X, Y ja Z kanssa. Jokaiselle akselille tulee yksi kiihtyvyyss- ja yksi gyroskoopianturi alla olevan kuvan Kuva 2.22 tapaan. Kiihtyvyyssantureiden mittaamien kiihtyvyyksien positiiviset suunnat on merkitty a_x , a_y ja a_z . Kulmanopeutta mittaavien gyro-antureiden mittaussuunnat on identifioitu kulmanopeuden symbolilla ω alaindeksin kertoessa mittaussuunnan.



Kuva 2.22: Gyro- ja kiihtyvyyssanturien mittausakselit

Gyro-anturin ulostulostulosignaali on kulmanopeus, josta saadaan integroimalla kappaleen kiertokulma kyseisen akselin suhteen suhteessa edelliseen tunnettuun kiertokulmaan. Kolmen anturin kombinaatiolla pystytään seuraamaan kappaleen orientaatiota täydellisesti eli X-, Y- ja Z-akselien suhteen ulkoisessa koordinaatissa.

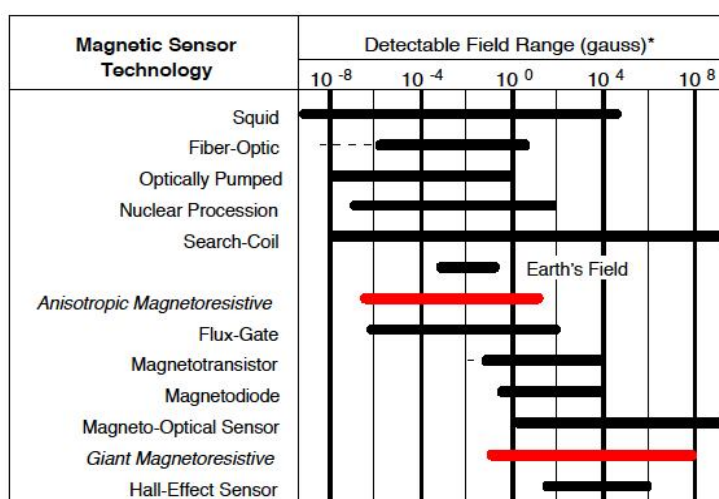
Integrointi johtaa valitettavasti virheiden kumuloitumiseen, jolloin orientaation tarkkuus on sitä huonompi mitä kauemmin paikannus on ollut käynnissä, mikäli gyro-anturi ei ole täysin ideaali.

Kiihtyvyyssanturin ulostulosta saadaan integroimalla anturin mittaussuunnan suuntainen nopeus, josta edelleen integroimalla saadaan kappaleen akselin suuntainen etenemä. Koska kappaleen asento ulkoisessa koordinaatistossa tunnetaan, tunnetaan myös etenemä ulkoisessa koordinaatistossa, jolloin kappaleen absoluuttinen sijaintikin tunnetaan, mikäli lähtöpaikan absoluuttinen sijainti tiedetään.

INS-moduuleissa voidaan käyttää apuantureina esimerkiksi barometriä, sähköistä kompassia sekä GNNS-vastaanotinta.

2.5.4. Magneettianturielementit

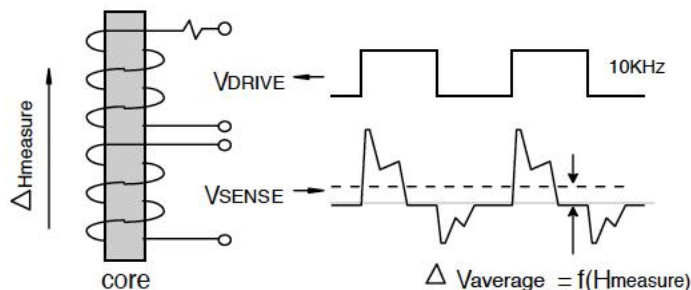
Alla olevassa taulukossa on esitelty magneettianturielementtien toteutusteknologioita ja niiden mittausalueita. Tyypillisesti maan magneettikentän mittaukseen anturielementin tarkka mittaalue tulisi olla yhdestä mikrogaussista kymmeneen gaussiin [9, s. 1.]. Taulukon vaihtoehtoista tämän vaatimuksen täyttää useampikin vaihtoehto. Näistä kuitenkin squid, kuituoptinen (fiber optic), optisesti pumpattu (optically pumped) ja nuclear precision ovat laboratorio- ja tutkimuskäyttöön tarkoitettuja tarkkuusinstrumentteja eikä niitä siksi käsitellä tässä tarkemmin. Etsintäkela (search coil) perustuu induktioon vaatien siten toimiakseen joko magneettikentän tai kappaleen liikkumisen. Jäljelle jäävät Flux gate – ja anisotrooppiset magnetoresistiiviset -anturit, joista molempia käytetäänkin kompassisovelluksissa.



Taulukko 2. 6: Vaihtoehtoisia magneettianturiteknologioita [9, s. 2.]

Flux gate -anturissa yhden sydämen ympärille on käämitty heräte- ja mittauskela kuten alla olevasta kuvasta Kuva 2.23 nähdään. Herätekelaan ajetaan kanttiaaltoja, jota

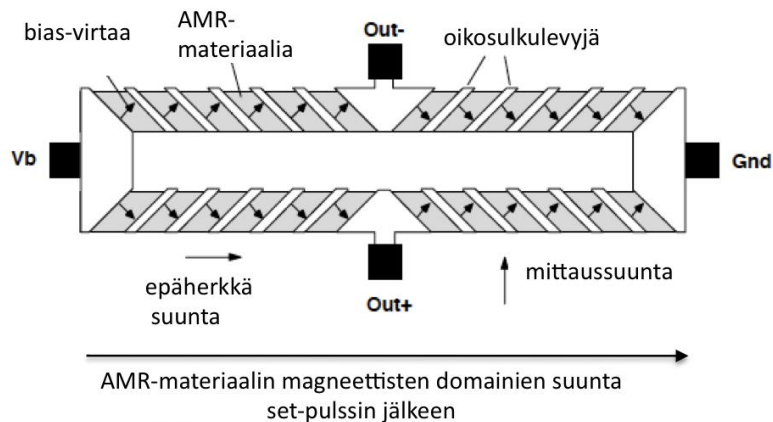
mitataan mittauskelasta. Ulkoisen magneettikentän suunta ja voimakkuus vaikuttaa sydämen ominaisuuksiin, mikä siirtyy mittauskelalla nähtävään signaaliin. Anturin mittausalueen taajuuskaista yltää noin yhteen kilohertsiin. Flux gate -anturielementit ovat yleensä suurehkoja eivätkä erityisen robusteja.



Kuva 2.23: Flux gate -anturielementti [9, s. 3.]

Flux gate- anturin tavoin myös AMR-anturielementti pystyy mittaamaan staattisen magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa. AMR-elementissä on nikkeli-rauta-seoksesta suoraan piille valmistettu ohut filmi, jonka resistanssiin ulkoinen magneettikenttä vaikuttaa maksimissaan noin 2-3% [9, s. 4]. Resistanssin muutos mitataan kuten resistanssi yleensäkin, eli tasavirta- tai jännitelähteen avulla. Tässä on oleellinen ero flux gate -elementtiin, joka vaatii herätteeksi vaihtojännitesignaalin. Valmistustekniikan ja osaltaan myös dc-eksitaatiojännitteen tai -virran ansioista AMR-sensorelementit ovat riittävän pienikokoisia ja vähän virtaa kuluttavia, jolloin niitä voidaan käyttää kannettavissakin elektroniikkatuotteissa.

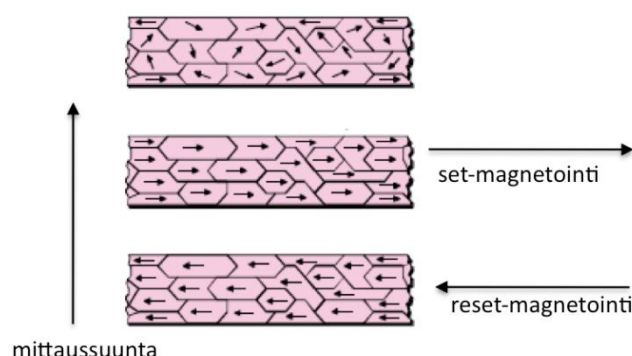
Yksi AMR-elementti koostuu neljästä Wheatstone-siltaan kytketystä filmistä alla olevan kuvan Kuva 2.24 tapaan. Oikosulkulevyt (shorting bars) ohjaavat virran kulkemaan 45 asteen kulmassa suhteessa filmin pituusakseliin. Tämä johtuu siitä, että virta valitsee reitin, jonka kokonaisresistanssi on pienin. Materiaalin ollessa resistanssiltaan kauttaaltaan yhtenevää, tulee lyhyin reitti valituksi. Kuvassa Kuva 2.24 virran kulkusuuntaa kuvaavat oikosulkulevyjen välissä olevat nuolet.



Kuva 2.24: AMR-anturielementin rakenne [9, s. 5.]

Sillan kokonaisresistanssi Vb- ja GND-terminaalien väliltä mitattuna on tyypillisesti noin $1k\Omega$, maksimieksitaatiojännite 5-25 voltia ja herkkyys $1mV/V$ gaussi. Herkkyys tulkitaan niin, että yhden gaussin kenttä tuottaa yhden voltin eksitaatiojännitteellä $1mV$ jännite-eron mittaussillan Out+ ja Out- -terminaalien välille.

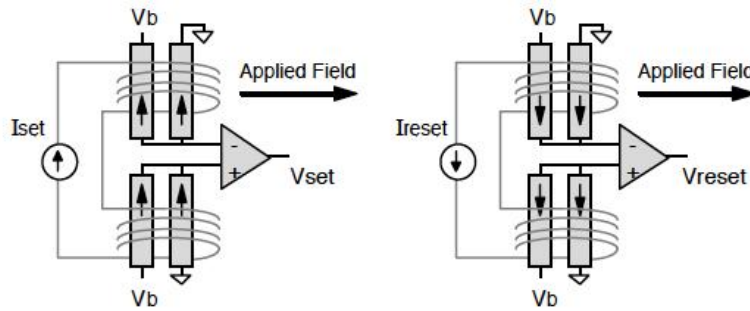
Herkkyyteen vaikuttaa olennaisesti se kuinka yhdensuuntaisesti AMR-filmin magneettiset domainit ovat järjestäytyneet. Alla olevassa kuvassa Kuva 2.25 ylimpänä on filmi, jossa domainit ovat täysin epäjärjestyksessä. Näin sekaisin domainit eivät käytännössä voi olla kun filmin valmistusprosessin jälkeen. Voimakas ulkoinen magneettikenttä järjestää domainit yhdensuuntaisiksi kuten alemmissa set- ja reset-magnetointi -kuvissa nähdään.



Kuva 2.25: Magneettiset domainit AMR-filmissä [9, s. 5.]

Sekä set- että reset-magnetointien jälkeen domainit ovat järjestyneet ideaalisti, eli täysin yhdensuuntaisesti ja kohtisuoraan mittaussuuntaan nähden. Täydelliseen järjestäytymiseen vaaditaan 60 - 100 gaussin kenttä [9, s. 6.]. Mikäli ulkoinen kenttä ei ole tarpeeksi voimakas, ei täydellistä järjestäytymistä tapahdu, jolloin anturin herkkyys jää nimellisherkkyyttä alhaisemmaksi. Ulkoiset, täydelliseen järjestäytymiseen vaadittavaa heikommatkin kentät voivat kääntää domainien orientaatiota ja muuttaa siten elementin herkkyyttä. Tämän lopputuotteen luotettavuuden kannalta erittäin kiusallisen ilmiön ratkaisemiseksi on anturielementin välittömään läheisyyteen asennettu kela, johon ajettavalla virtapulssilla saadaan anturielementin magneettiset domainit järjestettyä täydellisesti. Parhaan mahdollisen lopputuloksen saavuttamiseksi on kelan tuottaman magneettikentän oltava yhdensuuntainen anturielementin epäherkän mittaussuunnan kanssa. Kela voi olla ulkoinen tai integroitu anturielementtiin. Kelaan ajettavan virtapulssin suunta määrää magneettisten domainien järjestäytymissuunnan. Kuvan Kuva 2.26 vasemman puoleisessa piirroksessa anturielementtiin ajetaan set-pulssi. Ulkoinen mitattava kenttä (kuvassa Applied Field) tuottaa tällöin anturin nimellisherkkyyden mukaisen tuloksen. Reset-pulssilla virta kulkee kelassa vastakkaiseen suuntaan, jolloin domainien järjestäytymissuunta on päinvastainen. Käytännössä tämä näkyy siten, että anturin herkkyys muuttuu negatiiviseksi eli elementin positiivinen mittaussuunta kääntyy 180 astetta. Herkkyyden itseisarvot ovat

set- ja reset-pulssien jälkeen yhtä suuret, mikäli molemmat pulssit tuottavat vähintäänkin domainin täydelliseen järjestäytymiseen tarvittavan kenttävoimakkuuden.



Kuva 2.26: Set- ja reset-pulssit [9, s. 6.]

Set- ja reset-pulsseja voidaan hyödyntää myös anturielementin sekä koko signaaliketjun lämpötilariippuvuuksien sekä offsettien eliminoinnissa. Matemaattinen perusta on esitetty alla olevissa kaavoissa (17) – (19). V_{set} on anturin ulostulo set-pulssin jälkeen ja V_{reset} välittömästi edellisen set-mittauksen perään annetun reset-pulssin jälkeen. S on herkkyys ja $H_{applied}$ ulkoisen kentän voimakkuus. V_{os} on anturin offset-jännite. [8, s. 6.]

$$V_{set} = S * H_{applied} + V_{os} \quad (17)$$

$$V_{reset} = -S * H_{applied} + V_{os} \quad (18)$$

$$V_{set} - V_{reset} = 2S * H_{applied} \quad (19)$$

Kaavasta (19) nähdään offset-termien katoavan tuloksesta. Ulkoisen kentän voimakkuus saadaan kaavalla (20). Mikäli V_{set} - ja V_{reset} -jännitteiksi mielletään AD-muuntimen antama muunnos, huomataan, että koko signaaliketjun offset-jännitteet ja offsettien lämpötilariippuvuudet tulevat kompensoituiksi. Kompensoinnin laskutoimitukset on luonnollisesti tehtävä tällöin AD-muunninta lukevassa mikrokontrollerissa tai muussa digitaalisessa prosessointiyksikössä. Set-reset-tekniikkaa hyödyntävä kompensointi voidaan suorittaa myös puhtaasti analogisin keinoin ennen AD-muunnosta. Tällöin AD-muuntimen offset- ja sen lämpötilariippuvuus jäävät kuitenkin kompensoimatta.

$$H_{applied} = (V_{set} - V_{reset}) / 2S \quad (20)$$

AMR-anturielementin virhelähteitä ovat kohina, epälineaarisuus, hystereesi ja toistettavuusvirhe. Offset-virhe sekä offsetin lämpötilariippuvuus pystytään kompensoimaan set/reset -tekniikalla. Myös hard iron -kalibrointi poistaa anturin offset-

virheen. Alla olevassa taulukossa Taulukko 2.7 on annettu esimerkki AMR-anturin virhebudjetista kohinan, lineaarisuuden, hystereesin sekä toistettavuuden osilta.

Taulukko 2.7: AMR-elementin virhebudjetti [7, s. 3]

Parametri	Maksimivirhe	Kenttävoimakkuutena	Suuntimana
Kohina (kaista 10Hz)	0.085 mgaussia	0.085 mgaussia	$< 0.01^\circ$
Lineaarisuus	0.08 % FS	0.200 mgaussia	0.06°
Hystereesi	0.08 % FS	0.320 mgaussia	0.09°
Toistettavuus	0.08 % FS	0.320 mgaussia	0.09°
Virheen tehollisarvo yhteensä		0.490 mgaussia	0.14°

2.5.5. Gyro-anturit

Gyroskoopit eli gyro-anturit luokitellaan kolmeen pääluokkaa suorituskynsä perusteella. Tärkeimmät luokittelukriteerit nähdään alla olevassa taulukossa Taulukko 2.8 [10, s.1648]. Inertiaali-luokan gyrojen suorituskyyky on paikoituskäyttöön paras ja rate-luokan huonoin.

Taulukko 2.8: Gyro-antureiden luokittelu suorituskyyvyn mukaan

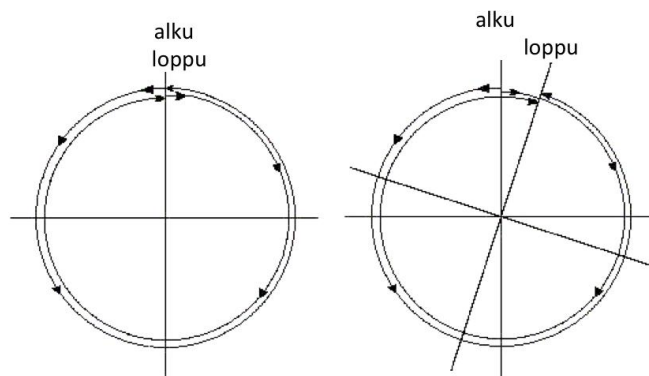
Ominaisuus	Rate-luokka	Taktinen-luokka	Inertiaali-luokka
Satunnaiskävely $^\circ / h$	> 0.5	0.05 - 0.5	< 0.001
Valuma $^\circ / h$	10 - 1000	0.1 - 10	< 0.01
Herkkyysvirhe %	0.1 – 1	0.01 - 0.1	< 0.001
Mittausalue $^\circ / s$	50 - 1000	> 500	> 400

Satunnaiskävely on tilastollinen suure, joka saadaan kääntelemällä isoa joukkoa antureita mittaustasossaan satunnaisin askelein. Tunnin kuluttua verrataan antureiden ulostuloista integroimalla saatuja paikkoja antureiden todellisiin sijainteihin. Keskimääräistä erotusta kutsutaan satunnaiskävelyksi (random walk).

Valuma (drift) on anturin ulostulosta integroimalla saatava paikkavirhe, kun anturia pidetään tunnin ajan paikallaan. Herkkyysvirhe kertoo eron anturin todellisen ja nimellisherkkyyden välillä. Herkkyysvirheen takia anturin antama signaali muunnetaan väärällä kertoimella kulmanopeudeksi, mikä aiheuttaa virheen myös paikkalaskentaan. Herkkyysvirheen merkitys korostuu mitä enemmän ja suuremmilla kulmanopeuksilla anturi liikkuu. Mittaus-alue määrittelee maksimikulmanopeuden, jota anturi pystyy seuraamaan.

Ominaisuuksista nähdään, että inertiaali-luokan gyron stabiilius riittää tuntienkin itsenäiseen paikannukseen hyvin suurella tarkkuudella. Taktisen-luokan gyron paikannusvirhe tunnin aikana on luokkaa 1- 10 astetta, kun herkkyysvirheen vaikutusta ei huomioida. Rate-luokan antureita on yleensä mahdotonta käyttää paikannukseen muuten kun enintään muutaman minuutin jaksoja kerrallaan. On kuitenkin vielä huomattava, että rate- luokan sisällä tarkkuus- ja stabiiliusominaisuuksien hajonta on hyvin suurta. Joukossa on pelkästään kulmanopeuden mittaamiseen tarkoitettuja antureita, jotka eivät sovellu paikannuskäyttöön laisinkaan ja antureita, joiden ominaisuudet riittävät lyhyeen muutaman minuutin melko tarkkaan itsenäiseen paikannukseen.

Gyro-antureiden taustalla on useita eri teknologioita. Tarkimmat ja stabiileimmat eli inertiaali- ja taktisen luokan anturit ovat useimmiten kuitu-optis- (fiber optic) tai rengas-laser (laser ring) -tyyppisiä. Molemmat tekniikat hyödyntävät sagnac-ilmiötä. [11, s. 328.] Sen perusperiaate on hyvin yksinkertainen. Ympyrän muotoiseen valojohteeseen lähetetään kaksi vastakkaisiin suuntiin kulkevaa valonsädettä. Mikäli johdinta käännetään keskipisteensä suhteen pulssien ollessa matkalla, joutuu kiertosuuntaan lähetetty pulssi kulkemaan yli johtimen kehän pituisen matkan saavuttaakseen lähetyspisteensä. Vastaavasti kiertosuuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan lähetetyn pulssin kulkumatka jää alle johtimen kehäpituuden. Kuvan Kuva 2.27 oikeanpuolisessa kuvassa ilmiötä on selvennetty. Siinä valojohdinta on käännetty myötäpäivään pulssien lähetys- ja vastaanottohetkien välillä. Vasemmanpuolinen kuva esittää tilanteen, kun johtimeen ei kohdistu rotaatioliikettä.



Kuva 2.27: Sagnac-ilmiö

Rate-luokan gyrot perustuvat yleensä MEMS-teknologiaan nykyaikaisten kiihtyvyyss- ja inklinometriantureiden tapaan. Perusperiaate on saattaa mikromekaaninen rakenne värähtelemään vakiotajuudella ja seurata sitten kiertotoliikkeen coriolisvoiman kautta värähtelyyn aiheuttamaa muutosta esimerkiksi kapasitiivisesti tai induktiivisesti. Rakenne on herkkä pääsääntöisesti ainoastaan kulmanopeudelle eikä lineaarikiihtyvyyksille, missä on kuitenkin paljon vaihtelua rakenteen geometriasta riippuen. Anturivalmistajien datalehtien perusteella paras lopputulos saavutetaan

rengasrakenteilla anturielementin suurehkon koon kustannuksella. Toinen yleinen käytetty värähtelyelementin geometria on anturielementin pienemmän koon mahdollistava tasomainen haarukkarakenne, jonka heikkoutena ympyrärakenteeseen nähden on kuitenkin suurempi herkkyys lineaarikihtiävyyksille.

3. SUUNNITTELU

3.1. Suunnitteluvuo

Alla olevassa kuvassa 3.1 on esitetty projektin kulku pääpiirteissään. Mahdollisia elektroniikan uudelleensuunnittelua ja siitä seuraavia ylimääräisiä protokierroksia ei ole piirretty kaavioon. Aikajana etenee kuvassa alaspäin. Laatikon pinta-ala antaa viitteen osatehtävän arvioidusta työmäärästä suhteessa toisiin osatehtäviin. Laatikon korkeus määrittää tehtävän keston. Suunnittelun osalta haasteellisimmiksi osa-alueiksi arvioitiin teknologiavalinnat sekä ohjelmistokehitys. Tässä luvussa paneudutaan tarkemmin alla esitetyistä osatehtävistä vaatimusmäärittelyyn sekä teknologia- ja komponenttivalintaan.



Kuva 3.1: Suunnitteluvuo

3.2. Vaatimukset

Keskeisimmät kaivinkoneen työnohjaukseen tarkoitetulle suuntima-anturille asetetut vaatimukset ovat seuraavat:

- Työkoneympäristöön soveltuvuus
- CAN open -liitäntä
- Reaaliaikainen mittaus
- Itsenäisyys
- Absoluuttianturi
- Absoluuttinen tarkkuus vähintään $\pm 0.5^\circ$
- Suunniteltavuus
- Valmistettavuus
- Asennettavuus
- Käytettävyys
- Kustannustehokkuus

Suuntima-anturimoduulin täytyy olla työkoneympäristöön soveltuva. Sen on kestävä kappaleessa 2.3 esitetyt tyypilliset työkoneympäristön rasitukset, joista anturimoduulien kannalta yleensä haasteellisimpia ovat laaja $-40...+80$ celsius asteen käyttölämpötila-alue sekä matalat muutaman hertsin taajuiset värähdykset ja värinät. Anturi ei saa myöskään häiriintyä työkoneen normaaleista liikkeistä tai toisista sähkölaitteista.

Suuntima-anturin CAN-rajapinnan tulee täyttää CAN- ja ISO 11898-2 high speed CAN -spesifikaatioiden vaatimukset sekä CAN open DS301 -spesifikaatio. Suuntima-anturille ei ole olemassa erillistä laiteprofiilia, joten laitespesifinen rajapinta voidaan määritellä itse.

Moduulin täytyy tuottaa riittävän reaaliaikaista suuntima-arvoa kinematiikkalaskennan käyttöön. Käytännössä tämä tarkoittaa sekä riittävän lyhyttä, korkeintaan noin 50 ms:n moduulin sisäistä mittausviivettä sekä sitä, että moduuli pystyy lähettämään datan väylälle vähintään 30 ms:n välein. Näin voidaan varmistua, että kuljettaja kokee järjestelmän viipeettömänä. Ylärunon maksimikulmanopeus, jota anturin täytyy sujuvasti seurata, on 36 astetta sekunnissa, mikä vastaa 10 sekunnin kierrosaikaa täydelle 360 asteen pyörähdykselle.

Anturin on oltava itsenäinen, eli se ei saa edellyttää esimerkiksi työmaalle asennettavien referenssipisteiden tai esimerkiksi radiomajakoiden käyttöä. Suuntima-anturimoduuli voi kuitenkin hyödyntää muiden työkoneen sisäiseen CAN-väylään liitettyjen moduulien palveluita ja tarjoamaa dataa.

Anturin on mieluiten oltava luonteeltaan absoluuttianturi, jolloin oikea suuntimatieto on käytössä välittömästi virtojen kytkemisen jälkeen. Tämä vaatimus ei kuitenkaan ole aivan ehdoton.

Suuntiman absoluuttisen tarkkuuden tulee olla vähintään $\pm 0.5^\circ$ astetta, jotta korkovirhe 10 %:n luiskassa jää alle yhteen senttimetriin.

Moduulin on oltava riittävän suunniteltava. Muussa tapauksessa projekti venyy, mistä seuraa helposti kustannus- ja aikatauluongelmia.

Suunnittelussa on huomioitava moduulin valmistettavuus. Huonolla valmistettavuudella on negatiivinen vaikutus valmistuskustannuksiin ja usein siitä seuraa myös laatuongelmia. Valmistettavuus on otettava huomioon koko tuotantoketjun suhteen alkaen piirilevyvalmistuksesta ja ladonnasta aina loppukokoonpanoon ja tehdaskalibrointiin.

Suuntima-anturin on oltava helposti asennettava. Asennuksessa ei saa tarvita kalliita erikoistyökaluja kuten takymetriä eikä erityistaitoja, jotta esimerkiksi koneen kuljettaja pystyy tarvittaessa hoitamaan varaosan asennuksen. Edelliset pätevät myös asennuskalibrointiin.

Moduulin käytettävyyden tulee olla hyvä. Ideaalitapauksessa anturi on koneen kuljettajalle täysin huomaamaton laite niin, ettei esimerkiksi päivittäisille kalibroinneille ole tarvetta.

Jotta suuntima-anturi olisi tuotteena järkevä, täytyy sen olla valmistuskustannuksiltaan riittävän edullinen. Tavoiteomakustannehinta toimitusvalmiille moduulille on 600 euroa.

3.3. Teknologiaavalinta

Teknologiaavalinta osoittautui haasteelliseksi. Alla olevassa taulukossa Taulukko 3.1 on arvioitu selvitystyön pohjalta kuinka eri teknologiat täyttävät vaatimukset. Vaatimuksen täyttäminen on pisteytetty yhdestä viiteen siten, että yksi tarkoittaa, että vaatimus täytetään huonosti viiden merkitessä erinomaisuutta. Kysymysmerkki kuvaa epävarmuutta johtuen esimerkiksi datalehtien suoranaيسista puutteellisuuksista tai siitä, että kaivinkoneympäristön vaikutuksesta ei ole tarkkaa tietoa.

Taulukko 3.1: Teknologiaavalintamatriisi

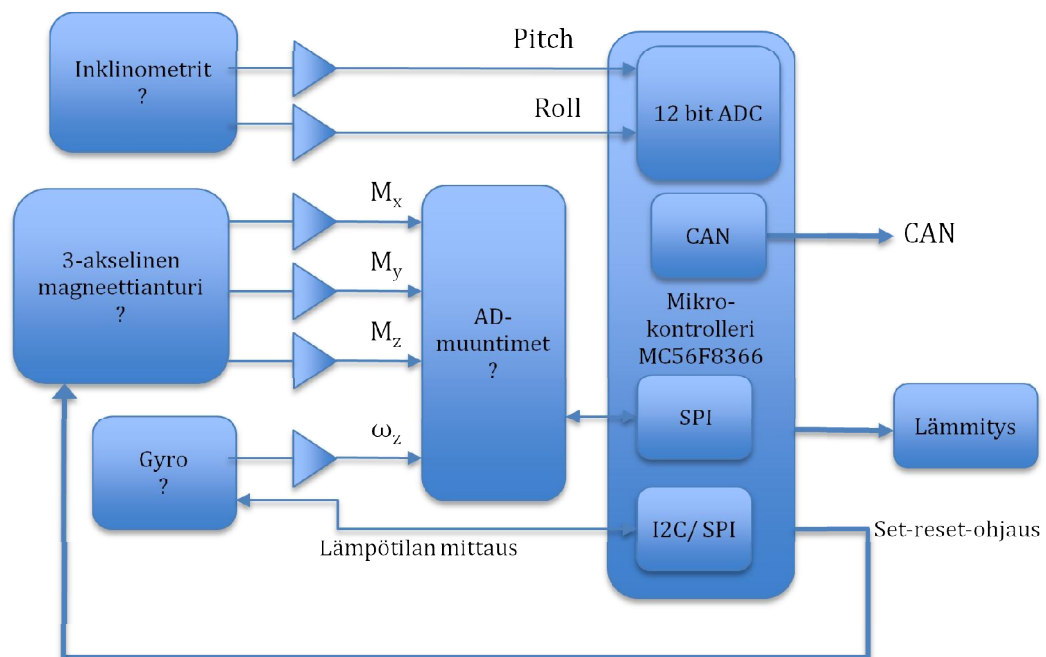
	Kallistus kompensoitu 3-akselinen kompassi	Taktinen tai inertiaali- gyro	Rate- Gyro	Valmis 3- akselinen kompassimoduuli	Valmis inertia- navigointimoduuli
Absoluuttianturi	3	2	1	3	4
Riittävä tarkkuus	3?	4	2	2-3?	4?
Lämpötilariippuvuus	3	5	2	3?	4?
Tärinän sieto	3	4?	4	3?	5?
Kallistusten sietokyky	4	4	3	4	5
Reaaliaikaisuus	4	4	5	2	2-3
Suunniteltavuus	3	3	2	3	4
Valmistettavuus	2	3	4	3	4
Asennettavuus	2-3?	4	4	2-3?	4
Saatavuus	5	1	4	5	2
Hinta	4	1	3	4	1

Kirjallisuusselvityksen perusteella suorituskyvyn kannalta parhaiksi vaihtoehtoisiksi nousivat navigointikäyttöön tarkoitetut taktisen ja inertiaali-luokan gyroskoopit sekä valmiit inertianavigointimoduulit. Molempien komponenttien osalta hinta kuitenkin ylitti selvästi koko suuntima-anturimoduulin enimmäisomakustannehinnan. Lisärasitteena molemmilla on heikko saatavuus johtuen esimerkiksi Yhdysvaltojen asettamista vientirajoituksista. Valmiiden kompassimoduulien ongelmana oli heikohko tarkkuus ja epävarmuus siitä kuinka moduulit pystytään kenttäkalibroimaan kaivinkoneessa. Näin ollen ainoaksi vaatimukset edes likimain täyttäväksi vaihtoehtoksi jäi komponenteista rakennettu sähköinen 3-akselinen kallistuskompensoitu kompassi. Rakentamalla kompassi komponenteista uskottiin pystyttävän vaihtamaan valmiiden kompassimoduulien tarkkuutta todennäköisesti eniten heikentävät komponentit eli inklinometrianturit tarkempiin. Samalla saadaan digitaalinen signaalinkäsittely omiin ja toivottavasti tarkempiin käsiin. Kompassianturien rinnalle otettiin mukaan rate-luokan gyroskoopianturi, jonka avulla arveltiin pystyttävän kompensoimaan ainakin lyhytkestoisia magneetti- ja kallistusantureiden häiriöitä. Kokonaisuutta voisi luonnehtia omatekoiseksi karsituksi inertianavigointimoduuliksi.

3.4. Piirikaaviosuunnittelu

Piirikaaviosuunnittelu aloitettiin teknologiavalinnan ja sivistyneiden arvausten pohjalle perustetun, kuvassa Kuva 3.2 nähtävän karkean tason lohkoavion laadinnalla. Kysymysmerkki kertoo, että tarkka komponenttivalinta on vielä tekemättä. Antureiden ja AD-muuntimien välisellä signaalitiellä olevat kolmiot pitävät sisällään kaiken

tarvittavan analogisen signaalinkäsittelyn eikä pelkästään mahdollista puskurointia tai vahvistusta.



Kuva 3.2: Suuntima-anturin periaatteellinen lohkokkaavio

Ennalta arvioitiin, että magneettianturit sekä gyro-anturi edellyttäisivät mikrokontrollerin sisäistä 12-bittistä tarkempaa AD-muunninta. Kokemuksen mukaan sisäinen muunnin olisi kuitenkin riittävän tarkka inklinometriantureille.

Projektissa haluttiin käyttää mahdollisuuksien mukaan tuttua mikrokontrolleria, joista valittiin Freescalen MC56F8366, jossa yhdistyy yleismikro-ohjaimen laaja oheispiirivalikoima digitaalisessa signaalinkäsittelyssä tarvittavaan laskentatehoon. Tärkeimmät kontrollerin sisältävät oheispiirit tämän projektin kannalta ovat 12-bittinen, nopea ja tarkka AD-muunnin sekä CAN-kontrolleri. Muut keskeiset MC56F8366:n ominaisuudet ovat:

- Sisäistä RAM-muistia 32kb
- Sisäistä FLASH-muistia 512kb
- 16-bittinen arkkitehtuuri
- Laskentateho 60MIPS maksimikellotaajuudella 60MHz
- Automotive-luokan -käyttölämpötila-alue

3.4.1. Yleiset analogiakomponenttien valintaperiaatteet

Seuraavassa on listattu analogiakomponenttien hyväksi havaitut yleiset ja yhteiset valintaperiaatteet:

- Komponentti generoi mahdollisimman vähän kohinaa
- Hyvä käyttöjännitekohinan vaimennuskyky (PSRR)
- Suuri tuloimpedanssi
- Riittävä virranajokyky
- Pieni koko
- Rail to rail -toiminta
- Pieni virrankulutus, kun kuormasta riippuvaa komponenttia ei huomioida
- Pienet offset-jännitteet (V_{os})
- Pienet lämpötilariippuvuudet
- Stabiilius signaaliketjussa esiintyvillä taajuuksilla ja kuormilla
- Riittävä kaistanleveys
- Lineaarisuus, käytös säilyy samana taajuudesta ja amplitudista riippumatta

Näitä periaatteita noudatettiin soveltuvilta osin kaikkien operaatiovahvistimien, AD-muuntimien, antureiden sekä referenssijännitte- ja käyttöjännittekomponenttien valinnassa.

3.4.2. Inklinometri-anturi

Inklinometrian turin keskeisimmät inklinometrispesifiset vaatimukset tässä sovelluksessa ovat seuraavat:

1. Mittausalue vähintään kaivinkoneen rungon maksimikallistusten verran eli $\pm 30^\circ$.
2. On päästävä vähintään 0.1 asteen absoluuttisen tarkkuuteen.
3. Mittaussuunta XY- tasossa, jottei tarvita erillisiä piirilevyjä.
4. Mahdollisimman pieni ristikkäisakseliherkkyys mittausalueella (cross axis sensitivity).
5. Käyttöjännite saa olla enintään 5 voltia.
6. On saavutettava mahdollisimman hyvä toiminta kaivinkoneympäristön tärinöissä.

Alla olevassa taulukossa Taulukko 3.2 vertaillaan VTI:n SCA610 ja SCA61T inklinometriä ominaisuuksia. Kumpikin ehdokas täyttää alustavan analyysin perusteella yllä esitetyt vaatimukset 1-6. Taulukon perusteella on kuitenkin ilmeistä, että SCA61T sensori on vaihtoehtoista laadukkaampi. On huomattava, että useimpien virhelähteiden aiheuttama kulmavirhe riippuu mitattavasti todellisesta kallistuskulmasta johtuen jännite-kulma-muunnoskaavan asin -funktioista (2.3.4), [6, s. 3.]. Kumpaakin anturia on saatavissa myös ± 30 asteen -mittausalueella, mutta kustannussyistä

päädyttiin käyttämään ± 90 asteen mallia, kun todettiin resoluution olevan siinäkin riittävä.

Taulukko 3.2: SCA610 ja SCA61T vertailu [11 ; 12]

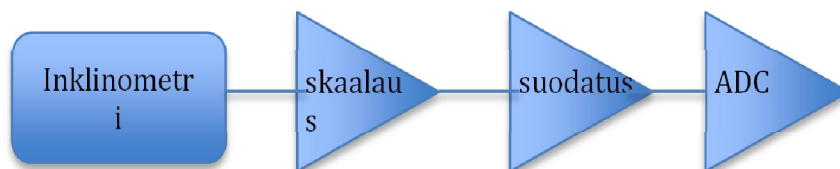
Parametri	SCA610-CA1H1G	SCA61T-FA1H1G	Yksikkö
Mittausalue	± 90	± 90	°
Mittaussuunta	X	X	
Herkkyys	2000	2000	mV/ g
Resoluutio 10Hz:n kaistalla	$0.95\text{mg} \Rightarrow 0.0661 @ 30^\circ$	0.0025	°
Epälineaarisuus	$\pm 10\text{mg} \Rightarrow \pm 8.1 @ 90^\circ$	± 0.57	°
Kohinatiheys	$30 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0.0008	°/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Aikastabiilius	-	0.014	°
Offsetin lämpötilakerroin (-25 ... +85°C)	-	± 0.008	°/ °C
Maksimi lämpötilariippuvuudesta johtuva offset-virhe (-25 ... +85°C) °	$\pm 50\text{mg} \Rightarrow \pm 2.87^\circ$	$\pm 0.48^\circ$	°
Herkkyiden lämpötilakerroin (25 ... +85°C)	-	± 0.014	°/ °C
Herkkyiden enimmäismuutoksen aiheuttama maksimikulmavirhe lämpötila-alueella -25 ... +85°C 90° kulmalla	$\pm 2.5\% \Rightarrow \pm 12.7$	$0.84\% \Rightarrow \pm 7.23$	°
Ratiometrinen virhe	2	± 1	%
Ristikkäisakseliherkkyys	5	4	%
-3dB:n taajuus	8-28	8-28	Hz

Alla olevassa taulukossa Taulukko 3.3 on listattu AD-muunnoksen ja kulmaresoluution väliset suhteet SCA61T-anturille herkkyiden ollessa 2000 mV ja muunnoksen maksimaalisen signaalialueen 5000mV. Kulman laskemiseen on käytetty kaavaa (1). Kulmaresoluutio ei riipu siitä, mille signaalialueelle jännitesignaali skaalataan muunnostarkkuuden pysyessä samana. Oletuksena on kuitenkin, että AD-muuntimen muut tarkkuusominaisuudet skaalautuvat vastaavasti tarkemmiksi tai ne ovat huomattavasti paremmat kuin anturin maksimiresoluutio.

Taulukko 3.3: AD-muunnoksen ja kulman resoluutioiden välinen suhde

Muunnostarkkuus bitteinä	Resoluutio askeleina	Resoluutio millivoltteina	Kulmaresoluutio välittömässä läheisyydessä 0-kulman
12	4096	1.2207	0.03487
13	8192	0.6104	0.01749
14	16384	0.3051	0.00874
15	32768	0.1526	0.00437
16	65536	0.0763	0.00219

Taulukon perusteella todettiin AD-muuntimen resoluutioksi riittävän 12 bittiä. Koska valitussa mikrokontrollerissa on nopea ja tarkka sisäinen muunnin päätettiin käyttää sitä. Muuntimen signaalialue on 0-3 voltia, jolle anturisygnäali joudutaan skaalaamaan, kuten alla olevassa kuvassa Kuva 3.3 nähdään.



Kuva 3.3: Kallistuskulmamittauksen signaalitie

Signaalia suodatetaan noin 100Hz:n rajataajuuden alipäästösuotimella käyttöjännite ja muiden ei-anturielementtiperäisten kohinoiden eliminoimiseksi. Näytteistystaajuudeksi valittiin 1kHz digitaalisen signaalikäsittelyn tarpeita silmällä pitäen.

3.4.3. Gyro-anturi

Gyro-anturin keskeisimmät gyrospesifiset vaatimukset tässä sovelluksessa ovat seuraavat:

1. Kuten kappaleessa 3.2 määriteltiin, on kaivinkoneen ylävaunun maksimikäännopeus 36°/s, mikä on samalla gyro-anturin mittausalueen minimiarvo.
2. Mittaussuunta XY- tasossa, jottei tarvita erillistä piirilevyä.
3. Mahdollisimman pieni asentoherkkyys
4. Käyttöjännite saa olla enintään 5 voltia.
5. On saavutettava mahdollisimman hyvä toiminta kaivinkoneympäristön tärinäissä.
6. Pieni koko.

Lisäksi keskeisenä rajoitteena on hinta, mikä rajaa varsinaiseen paikannuskäyttöön tarkoitetut taktisen ja inertiaaliluokan anturit pois.

Taulukossa Taulukko 3.4 on vertailtu Silicon Sensing CRS03-1 ja Analog Devices ADIS16255 gyro-antureita, jotka sopivat alustavan tarkastelun ja hintansa puolesta vaatimuksiin. CRS03 on täysin analoginen komponentti ADIS16255 sisältäessä koko signaalikäsittelyketjun alkaen referenssijännitteestä aina digitaaliseen konfiguroitavaan suotimeen. ADIS on myös jo tehtäällä kalibroitu ja siten muun muassa lämpötilakompensoitu, mikä käy selvästi ilmi tutkittaessa alla olevan taulukon Taulukko 3.5 arvoja. Vaikka ADIS16255-anturin helppous ja tarjoama tarkkuus olivatkin kiistattomia etuja, päädyttiin valinnassa kuitenkin Silicon Sensingin anturiin, koska signaalinkäsittely haluttiin pitää mahdollisimman pitkälle omissa käsissä.

Taulukko 3.4: Gyro-antureiden vertailutaulukko [13, s. 2. ; 14, s. 3.]

Parametri	CRS03-1	ADIS16255	Yksikkö
Mittausalue	± 100	± 80	$^{\circ}/s$
Liityntä	Analoginen	SPI	
Näytteistystaajuus väylältä päin nähtynä	-	256 max.	Hz
Mittausuunta	X	X	
Käyttöjännite	5	5	V
Herkkyys			
Nimellisherkkyyys	20	0.01832 LSB/ $^{\circ}/s$	mV/ $^{\circ}/s$
Vaihtelu käyttölämpötila-alueella	$< \pm 3$	$< \pm 1500$ ppm	%
Epälineaarisuus maksimisignaali-alueesta	$< \pm 0.5$	$< \pm 0.1$	%
Bias			
Nimellisbias	2500	0	mV
Nimellisbiaksen toleranssi	$< \pm 3$	0.066	$^{\circ}/s$
Vaihtelu käyttölämpötila-alueella	$< \pm 3$	± 0.3	$^{\circ}/s$
Ratiometrinen virhe	$< \pm 1$	$< \pm 0.4$	$^{\circ}/s$
Herkkyys lineaarikiikhtyvyyksille	$< \pm 0.1$	$< \pm 0.2$	$^{\circ}/s/g$
Satunnaiskävely	$< \pm 0.55$ (30 sek.)	3.6	$^{\circ}/s/h$
Kohina (3.. 10Hz kaistalla)	1	0.5 ($^{\circ}/s$ rms) (suodattamaton) 0.14 $^{\circ}/s$ rms (suodatettu)	mV rms
Resoluutio 10Hz:n kaistalla	1mV \Rightarrow 0.05	0.09	$^{\circ}/s$
Signaali-alue	0.5 ... 4.5	-	V
Aikastabiilius	?	?	$^{\circ}/s$
Ristikkäisakseliherkkyyys	< 5	?	%
-3dB:n taajuus	10	50 (säädettävä)	Hz

Alla olevassa taulukossa Taulukko 3.5 on listattu AD-muunnoksen ja kulmanopeuden resoluution väliset suhteet Silicon sensing CRS03-01 gyroskoopille. Anturin

nimellisherkkyyys (ω_{sens}) on 20 mV/°/s ja AD-muunnoksen maksimisignaali-alue V_{max} 5000mV. Kulman laskemiseen on käytetty alla olevaa kaavaa (21). Kulmanopeusresoluutio ei riipu siitä, mille signaali-alueelle jännitesignaali skaalataan, mikäli AD-muunnoksen resoluutio ADC_{res} pysyy ennallaan. Oletuksena on kuitenkin, että AD-muuntimen muut tarkkuusominaisuudet skaalautuvat vastaavasti tarkemmiksi tai ne ovat huomattavasti anturin maksimiresoluutiota paremmat.

$$\omega_{res} = (V_{max} / ADC_{res}) / \omega_{sens} \quad (21)$$

Taulukko 3.5: AD-muunnoksen ja kulmanopeuden resoluutioiden välinen suhde

Muunnostarkkuus bitteinä	Resoluutio askeleina (ADC_{res})	Resoluutio millivoltteina	Kulmanopeuden resoluutio (ω_{res} , °/s)
12	4096	1.2207	0.03487
13	8192	0.6104	0.01749
14	16384	0.3051	0.00874
15	32768	0.1526	0.00437
16	65536	0.0763	0.00219

Taulukon 3.5 perusteella nähdään, että AD-muunnoksen resoluutioksi riittää 13 bittiä, mikäli tyydytään juuri anturielementille ilmoitetun kohinan eli yhden millivoltin ylittävään resoluutioon. Koska 13 bittisiä AD-muuntimia ei ole, asetettiin muuntimen resoluutiolle minivaatimukseksi 14 bittiä. Mikrokontrollerin sisäisen AD-muuntimen resoluution ollessa 12 bittiä on käytettävä ulkoista muunninta. Näytteistystaajuudeksi valittiin jälleen 1kHz digitaalisen signaalikäsittelyn tarpeita silmällä pitäen. Muuntimen valintaa käydään läpi tarkemmin kappaleessa 3.4.5.



Kuva 3.4: Gyroskoopin analoginen signaalitie

Kuvassa Kuva 3.4 nähdään gyroskooppianturin signaalitien periaatteellinen lohkokaavio. Inklinometrin signaalitiehen nähden erona on ainoastaan skaalauksen korvaaminen puskuoinnilla. Alipäästösuodattimen rajataajuus on inklinometrin tavoin 100Hz.

Lämpötilariippuvuuden hallitsemiseksi anturin sisälle asennettiin 1 Wire -liityntäinen lämpötila-anturi. Lisäksi mikrokontrolleriin kytkettiin logiikkaliityntäinen teho-ohjainpiiri lämmitysvastuksen ohjaamiseksi.

3.4.4. Magneettianturi

Magneettiantureiden tärkeimmät anturispesifiset vaatimukset seuraavat:

1. Mittausalue ± 2 gaussia, minkä arvioitiin tarjoavan toisaalta riittävästi pelivaraa magneettisten häiriöiden aiheuttamille offset:lle ja toisaalta riittävän resoluution.
2. Vähintään 0.1 asteen resoluutio.
3. Tarvitaan sekä X-, Y- ja Z-suunnan mittausta
4. Mahdollisimman pieni ristikkäisakseliherkkyys mittausalueella (cross axis sensitivity).
5. Käyttöjännite mieluiten 5 voltia

Alustavan selvitystyön pohjalta vaihtoehtoiksi nousivat Honeywellin sekä NXP:n (silloinen Philips Semiconductors). NXP:n antureissa ei kuitenkaan ollut anturielementtiin integroitua set-reset-kelaa, mikä nähtiin suunnittelua huomattavasti monimutkaistavana tekijänä. Ulkoinen kela vie lisäksi ylimääräistä piirilevytilaa. NXP:n sovellusohjeiden muodossa tarjoama tekninen tuki ei myöskään ollut lähellekkään Honeywellin tasolla. Näin ollen anturivalinta keskittyi pelkästään Honeywellin tarjontaan.

Alla olevassa taulukossa Taulukko 3.6 on esitetty HMC1001/1002- ja HMC1055-anturiperheiden keskeisimmät parametrit. Molemmat perheet koostuvat kahdesta anturista, joista toinen sisältää X- ja Y-suunnan elementit yhteen piirin integroituna toisen sisältäessä Z-suuntaista kenttää mittaavan elementin. Järjestelyn etuna on se, että kaikki komponentit voidaan sijoittaa yhdelle piirilevyille, mikä yksinkertaistaa suunnittelua, vähentää todennäköisesti häiriöitä mittaussignaaleissa ja parantaa mitta-akselien keskinäistä kohtisuoruutta.

Taulukko 3.6: HMC1001/1002- ja HMC1055-anturiperheiden keskeisimmät parametrit [15, s. 2. ; 16, s. 2.]

Parametri	HMC1001/1002	HMC1055	Yksikkö
Mittausalue	±2	±6	gaussi
Integroitu set-reset-kela	Kyllä	Kyllä	
Integroitu offset-kela	Kyllä	Ei	
Eksitaatiojännite	0 ... 12	1.8 ... 20	V
Mittausillan kokonaisresistanssi	600 ... 1200	800 ... 1500	Ω
Epälineaarisuus	±0.5	±0.1	%FS
Hystereesi	±0.1	±0.06	%FS
Toistettavuusvirhe	±0.1	±0.1	%FS
Set/reset:n toistettavuusvirhe ulostulossa	10	?	μV
Bias (sillan ulostulojännite V ₁ - V ₂)			
Nimellinen	0	0	mV
Nimellistoleranssi (offset)	-15 .. +6	±1.25	mV / V
Lämpötilariippuvuus ilman set-reset-toimintoa	±0.03	±500 ppm/°C	% / °C
Lämpötilariippuvuus set-reset-toimintoa käytettäessä	±0.001	±10 ppm/°C	% / °C
Herkkyys			
Nimellinen	2.5 ... 4	0.8 ... 1.2	mV/V/gaussi
Lämpötilariippuvuus vakiojännite-eksitaatiolla	±0.03	-3000 ppm /°C	% / °C
Lämpötilariippuvuus vakiovirta-eksitaatiolla	±0.001	-10 ppm /°C	% / °C
Kohinatiheys	29	50	nV/ √Hz
Resoluutio 10Hz kaistalla	27	120	μGaussi
Ulkoisen kentän vähimmäisvoimakkuus, mikä vaikuttaa domainien yhdensuuntaisuuteen	3	20	gaussi
Ristikkäisakseliherkkyys			
ilman set- reset-toimintoa	±3	?	%FS
set-reset-toimintoa hyödynnettäessä	±0.5	?	%FS
Anturielementtien kohtisuoruus	?	0.01	°
Set-reset-keleiden resistanssi	1.5 ... 1.8	3 ... 5	Ω
Set-reset-keleiden virta	3 ... 5	0.4 ... 4	A

Taulukosta nähdään HMC1055-perheen olevan parempi lähes kaikissa ominaisuuksissa. Ainoastaan anturin nimellisherkkyys on HMC1001-perheessä parempi, mikä johtuu pienemmästä, joskin sovellukseen todennäköisesti varsin

riittävästä mittausalueesta. Herkkyys etu häviää kuitenkin osittain HMC1001-perheen HMC1055:teen verrattuna noin kymmenkertaiseen offset-jännitteen nimellistoleranssiin. Koska nimellistoleranssi näkyy silta-muotoisen anturin differentiaalisessa ulostulossa hyötysignaalin kaltaisena erojännitteenä, on se huomioitava signaaliketjun vahvistuksia mitoitettaessa. Näin ollen biaksen suuri nimellistoleranssin pienentää maksimivahvistusta, mikä pienentää samalla varsinaisen hyötysignaalin vahvistusta ja sitä kautta myös saavutettavaa resoluutiota. HMC1001-perheessä tätä kiusallista ominaisuutta voidaan hallita elementtiin integroitujen offset-kelojen avulla, jotka HMC1055:stä puuttuvat. Keloilla pystytään kompensoimaan myös anturin ulostulossa näkyvää, ympäristön hard iron -ilmiön aiheuttamasta magneettikentän anomaliasta johtuvaa offset-jännitettä. Offset-kelan käyttö vaatii kuitenkin tarkan ja säädettävän vakiovirtalähteen, jonka lämpötilariippuvuudesta tulee yksi järjestelmän kokonaistarkkuutta todennäköisesti huonontava lisätekijä. Vertailun perusteella magneettianturiksi valittiin HMC1055-perhe.

Analogisen signaalikäsitteilyketjun vahvistus G haluttiin luonnollisesti mahdollisimman suureksi, jotta AD-muuntimen koko mittausalue ja sitä kautta resoluutio saadaan maksimaalisesti hyödynnettyä. Laskelmassa oletetaan eksitaatiojännitteeksi V_{eks} ja AD-muuntimen signaalialueeksi V_{adc_max} 5 voltia. Nollan gaussin magneettikentän voimaakkuutta vastaa tällöin AD-muuntimen sisäänmenossa 2.5 voltin signaalitaso, mikäli anturielementti eikä signaalitie tuota signaalin offset-jännitettä. Signaalin maksimiampplitudi on tällöin ± 2500 millivoltia. Magneettikentän maksimivoimakkuudeksi H_{max} otettiin 2 gaussia. Taulukosta Taulukko 3.6 nähdään anturilementin enimmäisherkkyyden S_{max} olevan 1.2 mV/gaussi/V ja nimellisooffset-jännitteen $V_{off} \pm 1.25$ mV/V. Koska nimellisooffset-jännite on symmetrinen, riittää maksimivahvistuksen laskeminen joko positiiviselle tai negatiiviselle enimmäiskentänvoimakkuudelle. Maksimivahvistukseksi G_{max} saadaan alla olevalla kaavalla (22) 137. Laskelmassa ei huomioida signaalitien omaa offset-jännitettä.

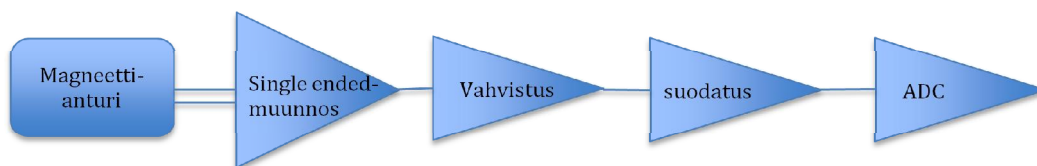
$$G_{max} = V_{adc_max} / (V_{eks} * (V_{off} + S_{max} * H_{max})) \quad (22)$$

AD-muuntimen vähimmäisresoluution laskemiseksi on ensin määriteltävä kenttävoimakkuuden minimi ja sen avulla kenttävoimakkuuden resoluution minimi. Oletetaan kentänvoimakkuuden minimiksi 200 miligaussia, jolloin 0.1 asteen kulmaresoluutio vastaa 0.39 milligaussin askelta H_{res} kentänvoimakkuudessa, kun oletetaan anturin olevan horisontaalitasossa [7, s. 3]. Anturin ulostulon jänniteaskeleeksi V_r saadaan alla olevalla kaavalla (23) 0.00156 millivoltia. S_{min} on anturin miniherkkyys.

$$V_r = V_{eks} * (S_{min} * H_{res}) \quad (23)$$

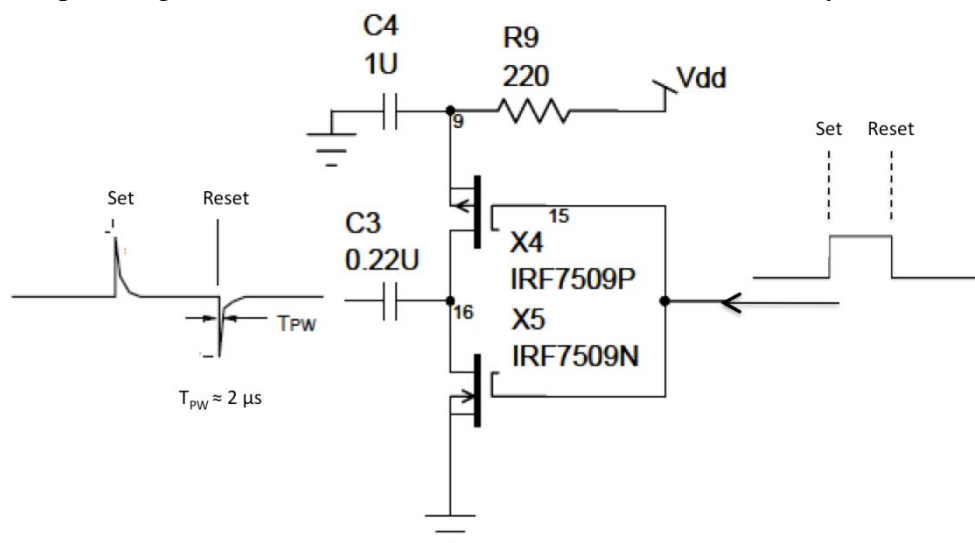
AD-muuntimen sisäänmenossa kaavalla (22) laskettua signaalitien maksimivahvistusta 137 käytettäessä nähdään tällöin 0.213720 millivoltin askel. Taulukosta Taulukko 3.3 nähdään, että askeleen havaitsemiseksi tarvitaan vähintään 15 bitin resoluutio eli käytännössä 16-bittiseen resoluutioon yltävä AD-muunnin. Tavoitenäytteistystaajuudeksi asetetaan jälleen 1 kHz samoista syistä kuin gyro- ja inlinometrian tureiden kohdalla.

Alla olevassa kuvassa Kuva 3.5 on esitetty yhden mittaussuunnan analogisen signaalitien periaatteellinen lohkokkaavio. Alipäästösuotimen rajataajuudeksi on asetettu jälleen 100 Hz.



Kuva 3.5: Magneettianturin analoginen signaalitie

Magneettiantureiden set-reset-toiminnon hyödyntäminen edellyttää tarvittavan virtapulssin generointiin esimerkiksi kuvan Kuva 3.6 kaltaisen kytkennän.



Kuva 3.6 : set-reset-toiminnon ohjauspiirit ja signaalimuodot [15, s. 7. ; 16, s. 9.]

Oleellista on synnyttää tarpeeksi voimakas virtapulssi, jotta syntyvä magneettikenttä on riittävän voimakas järjestämään anturielementin magneettiset domainit yhdensuuntaisiksi. HM1055-anturiperheen tapauksessa virtapulssin huippuvirran tulee olla 0.4 - 4 ampeeria ja keston 2 μ s.

3.4.5. ADC-muuntimien valinta

Taulukko 3.7 listaa gyro- ja magneettiantureiden sekä osittain myös sovelluksen asettamia vaatimuksia AD-muuntimille. Vertailun vuoksi mukana on myös

inklinomertianturin asettamat tarkkuusvaatimukset. Taulukosta nähdään magneettiantureilla olevan tiukimmat kriteerit AD-muunnokselle.

Näytteistettäviä kanavia on yhteensä 4 kappaletta. Ideaalitapauksessa niiden näytteistys onnistuu yhdellä muuntimella ilman ulkoisia analogiakytkin- tai -mux-piirejä. AD-muuntimen tulisi olla sarjaliityntäinen mieluiten SPI- tai I2C-väylällä.

Taulukko 3.7: AD-muuntimien vaatimusmatriisi mitattavien signaalien näkökulmasta

Parametri	Arvo			Yksikkö
	Inklinometri- anturi	Gyro- anturi	Magneetti- anturi	
Resoluutio	≥12	≥13	≥15	bittä
Efekttiivinen tarkkuus (ENOB) olettaen halutun signaalialueen	≥12	≥13	≥15	bittä
Tarvittava tarkkuus	1.2207	1.000	0.2137	mV
Signaalialue	0.5 ... 4.5	0.5 ... 4.5	0 ... 5	V
Näytteistystaajuus/akseli	≥1000	≥1000	≥1000	Hz
Näytteistettäviä kanavia	2	1	3	kappaletta

Esikartoituksessa löydettiin kohtuuhintainen taulukossa Taulukko 3.7 listatut vaatimukset lähes täydellisesti täyttävä Linear Technologyn $\Sigma\Delta$ (sigma delta) LTC2446 -muunnin. Poikkeuksena on saavutettava kanavakohtainen näytteistystaajuus, joka jäisi yhdellä muuntimella toimittaessa alla olevan taulukon Taulukko 3.8 mukaan 880 hertsiin. Koska näytteistystaajuudesta ei kuitenkaan haluttu tinkiä, päätettiin ottaa käyttöön kaksi muunninta. Ratkaisun kustannushaittaa kompensoi se, että tällöin myös inklinometrianurit voidaan kytkeä mikrokontrollerin sisäistä AD-muunninta vielä huomattavasti tarkempaan muuntimeen, jonka tarkkuus yltää inklinometrianpureiden kohinatason alle. Tämä tuo lisätarkkuutta erityisesti kaikkein kriittisimpiin eli nollan asteen kulman lähellä tapahtuviin kallistuskulman mittauksiin. AD-muunnoksen tarkkuus on näin noin dekadia suurempi kuin kallistusantureiden kohinatasot.

Seuraavassa taulukossa Taulukko 3.8 on esitetty LTC2446-muuntimen tärkeimmät parametrit kahden muuntimen konfiguraatiolla. Muuntimessa on sisäänrakennettuna kanavakohtainen digitaalinen FIR-suodin, jonka -3dB rajataajuus riippuu valitusta muuntimen näytteistystaajuudesta. 3.52 kHz:n taajuudella rajataajuus asettuu noin 1700 hertsiin.

Taulukko 3.8: LTC2446 AD-muuntimen parametrit [16]

Parametri	Arvo	Yksikkö
Signaalialue	0 ... 5	V
Kanavien lukumäärä	8	kappaletta
Maksiminäytteistystaajuus		
Koko muuntimen	3.52	kHz
Kanavaa kohden, jos 3 kanavaa käytössä	1.173	kHz
Kohina	0.023	mV _{RMS}
ENOB		
Maksimi	24	Bittia
Kolmella kanavalla	17	Bittia
Kokonaistarkkuus 3:lla kanavalla millivolteina	0.038	mV
FIR suodattimen -3dB taajuus		
Muuntimen miniminäytteistystaajudella 6.9Hz	3.3	Hz
Valitulla 3.52kHz:n Näytteistystaajudella	1696	Hz
Käyttöjännite	5	V
Referenssijännite	0.1 ... 5	V
Liityntä	SPI	

LTC2446-muuntimen muita etuja ovat suunnittelua yksinkertaistava sisäinen oskilaattori, latenssiton näytteistys ja jatkuva automaattikalibrointi.

4. KENTTÄTESTAUS

Kenttätestit tehtiin suurella Pirkanmaalaisella maansiirtotyömaalla. Kuvassa Kuva 4.1 nähdään suuntima-anturi asennettuna kaivinkoneen ylävaunun takaosaan. Asennuspaikka ei ole aivan ideaali konepellin ollessa hieman joustavaa. Lisäksi etäisyys koneen liikkuviin rautaosiin eli puomistoon ei ole suurin mahdollinen. Maston juuren ja pääpuomin tyven välinen etäisyys oli 1.7 metriä.

Suuntima-anturin elektroniikka on asennettu maston päässä olevaan alumiiniseen koteloon. Myös masto on valmistettu alumiinista.



Kuva 4.1: Kaivinkoneen takakannelle asennettu suuntima-anturi

Kaivinkoneena oli 30 tonnia painava tela-alustainen, normaalilla puomistolla varustettu Hitachi ZAXIS 280LC-3. Pääpuomin pituus oli 6.20 ja kaivuupuomin 3.11 metriä. Puomiston painoa ei tiedetty. Kaivuupuomin päässä oli noin 1000 kilogramman painoinen kauha. [18, s. 19.]

Maston ja suuntima-anturin asennuksessa oli ensiarvoisen tärkeää saada masto kohtisuoraan koneen ylärungon muodostamaan XY-tasoon nähden. Muussa tapauksessa suuntima-anturin ja asennusalustan eli kaivinkoneen XY-tasot eivät ole yhdensuuntaiset. Lisäksi suuntima-anturin ja koneen X-akselit yritettiin saada mahdollisimman yhdensuuntaisiksi. Koska käytössä ei ollut takymetriä, suunnattiin suuntima-anturin kotelon suuntausloven avulla. Korkeussäätö tehtiin maston jalustan kiinnitysruiden alle asennettavien sovitusprikkien avulla. Asennuksen onnistuminen varmistettiin vertaamalla suuntima-anturin ja kaivinkoneen asennuskalibroidun

runkoanturin antamia pitch- ja roll-kulmia toisiinsa. Kulmien ollessa antureiden maksimiresoluutioiden puitteissa samat voitiin suuntima-anturin olettaa olevan hyvin tarkasti koneen XY-tasossa ja suuntima-anturin mittausakseleiden koneen X- ja Y-akseleiden kanssa yhdensuuntaiset.

4.1. Kenttäkalibroinnit

Ennen varsinaisia kenttätestejä oli suuntima-anturi kalibroitava. Suuntima-anturimoduulin kokoonpanovaiheessa herkkyys- ja kotelon suhteen offset-kalibroituja inklinometriantureita ei kenttäkalibroitu, jotta suuntima-anturin asennuksen laatu voitiin todentaa vertaamalla suuntima-anturin ja runkoinklinometrin mittaamia pitch- ja roll-kulmia. Ja asennuksen ollessa onnistunut ei offset-kalibroinnille ole myöskään tarvetta anturin X- ja Y-akseleiden ollessa koneen X- ja Y-akseleiden kanssa jo yhdensuuntaiset.

Magneettiantureiden kalibroinnilla on tarkoitus kompensoida asennusympäristön eli tässä tapauksessa kaivinkoneen hard iron - ja soft iron -ilmiöistä aiheutuvat magneettikentän anomaliat. On huomattava, että kaivinkoneen aiheuttamien anomalioiden lisäksi myös ympäristön aiheuttamat anomaliat tulevat samalla kompensoiduiksi. Kalibrointi onkin syytä tehdä riittävän etäällä potentiaalisista häiriölähteistä kuten työkoneista, rakennuksista ja sähkökaapeleista. Vastaavasti kalibroitu suuntima-anturi on tarkimmillaan varmuudella ainoastaan kalibrointipaikassaan, joten parhaan tarkkuuden saavuttamiseksi tulisi magneettianturit kalibroida aina, kun konetta siirretään merkittävästi.

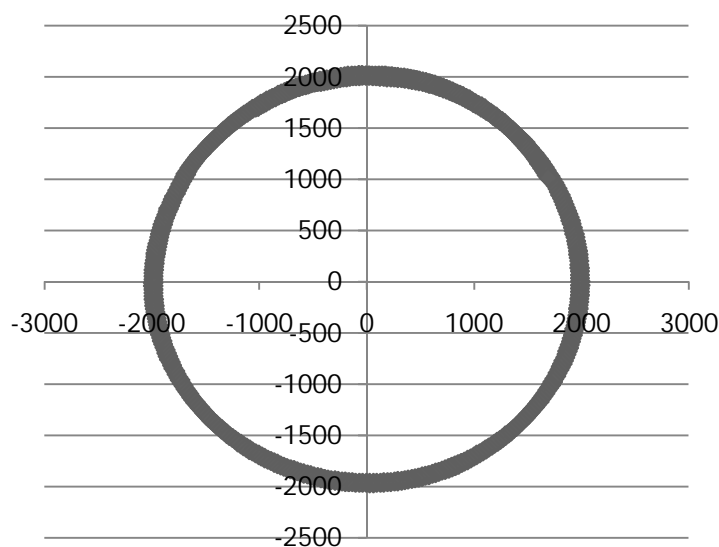
Magneettiantureiden X- ja Y-akseleiden kalibrointi oli kaksivaiheinen. Ensimmäiseksi tehtiin hard iron -kalibrointi samannimisen ilmiön aiheuttamien offsetin eliminoinniseksi, jonka jälkeen soft iron -kalibroinnilla yritettiin poistaa mahdolliset akseleiden skaalauserot.

Ennen kalibrointeja suuntima-anturin annettiin saavuttaa vakiolämpötila lämpötilariippuvuuksien vaikutusten eliminoinniseksi kalibroinneista sekä myös kalibrointeja seuraavista mittauksista. Moduulin sisälämpötilaa mittaavan anturin ulostuloa voitiin seurata CAN-väylän ja RS232-sarjaportin kautta. Lämpötilan vakioiduttua aloitettiin esivalmistelujen toinen osio eli kaivinkoneen asettelu horisontaalitasoon. Tarkoituksena oli saada koneen pitch- ja roll-kulmat mahdollisimman lähelle nollaa, jotta tilt-virhe ei loisi kalibrointeihin hardi iron-ilmiön kaltaisena näkyvää offset-virhettä. Tilt-kulman aiheuttama virhe nähdään kuvassa Kuva 2.15. Kaivinkoneen saaminen täysin vaateriin osoittautui käytännössä mahdottomaksi, kun käytössä ei ollut säädettäviä pukkeja tai muuta rakennelmaa, jolla koneen asentoa olisi voitu helposti säätää. Tyypillisesti kone saatiin vaaitettua 0.3 - 0.5 asteen

tarkkuudella. Tämän jälkeen moottorin käyntinopeus asetettiin vakioksi ja kaivinkoneen työvalot sekä ilmastointilaite sammutettiin.

Sekä soft iron -, että hard iron -kalibroinnissa kaivinkoneen ylävaunua pyöräytettiin vähintään 360 astetta riittävän alhaisella vakiokulmanopeudella, joksi arvioitiin 3°/s, mikä tarkoittaa 120 sekuntia täyden 360 asteen kierroksen kestonä. Alhaisen nopeuden arveltiin lisäävän kalibroinnin tarkkuutta pitämällä signaalien muutosnopeudet alhaisina. Tämän arvioitiin olevan erityisen tärkeää etenkin soft iron -kalibroinnissa. Siinä keskeisellä sijalla oli ellipsin pääakselin kulman määrittäminen, mihin tulee helposti virhettä, ellei antureiden ulostulosta ole käytettävissä riittävästi näytteitä.

Soft ja hard iron -kalibrointien jälkeen X- ja Y-akseleiden välille saavutettiin yleensä noin 2-3 prosentin tasapaino parhaiden tulosten yltäessä 0.8 prosenttiin. Alla olevassa kuvassa nähdään tyypillinen kalibrointien jälkeen tehdyn 360 asteen käännön tuottamista XY-arvopareista piirretty kuvaaja. Silmämääräisesti tarkastellen ympyrämuoto näyttää melko täydelliseltä ja origokeskeiseltä, mutta X- ja Y-arvoista laskettujen ympyrän säteiden vaihteluväli oli kuitenkin 2.8 prosenttia. Kalibroinnit eivät siis tuottaneet täysin ideaalia lopputulosta.



Kuva 4.2: 360 asteen pyörähdys hard iron - ja soft iron -kalibrointien jälkeen

Z-akselin magneettianturin kalibrointi tuotti hankaluuksia. X- ja Y-akseleille käytettyä pyörätysperiaatetta ei luonnollisestikaan voitu käyttää, koska kaivinkonetta ei voida kovin helposti kääntää hallitusti ylösalaisin. Z-akseli kalibroitiin lopulta kallistamalla kaivinkone mahdollisimman suureen kulmaan kaivinkoneen oman puomiston avulla. Kallistuksen aikana näytteistetyistä Z-magneettianturin ja X-inclinometrin datoista ohjelmisto arvioi Z-akselin offsetin.

Gyro-anturi kalibroitiin kenttätesteissä ainoastaan nollakulmanopeutta vastaavan biaksen suhteen. Vakiolämpötilan saavuttanutta suuntima-anturia pidettiin paikallaan 60 sekuntia, jonka perusteella ohjelmisto laski saavutettuun lämpötilaa sopivan biaksen.

4.2. Kenttätestien suoritus

Kone oli varustettu Axiomatic Technologies Oy:n yksiantennillisella 3D-koneenohjausjärjestelmällä vertailukulmien saamiseksi. Korjausdata saatiin VRS-verkon kautta. 3D-järjestelmän suuntimatarkkuus oli todennettu vähintään 0.15 asteeksi.

Itsenäisen 3D-kompassin osalta tehtiin seuraavat testit 1-3.

1. Suuntiman tarkkuus 90 asteen käännöissä koneen asennon ollessa mahdollisimman lähellä horisontaalitasoa.
2. Tilt-kompensoinnin toimivuus kallistettaessa kaivinkonetta pitkittäisakselin suunnassa eli kuvassa Kuva 2.14 nähtävän pitch-kulman suhteen.
3. Puomiston asennon vaikutus suuntimaan.

Suuntima-anturin gyro-osiolle tehtiin kymmenen minuutin ajotesti, jonka aikana ylärunkoa käännettiin satunnaisilla askeleilla ja nopeuksilla. Jakson lopuksi ylärunko palautettiin lähtöasentoon.

Testit suoritettiin välittömästi onnistuneiden kalibrointien jälkeen. Suuntima-anturin sisälämpötilaa seurattiin, jotta voitiin eliminoida lämpötilariippuvuuksien vaikutukset.

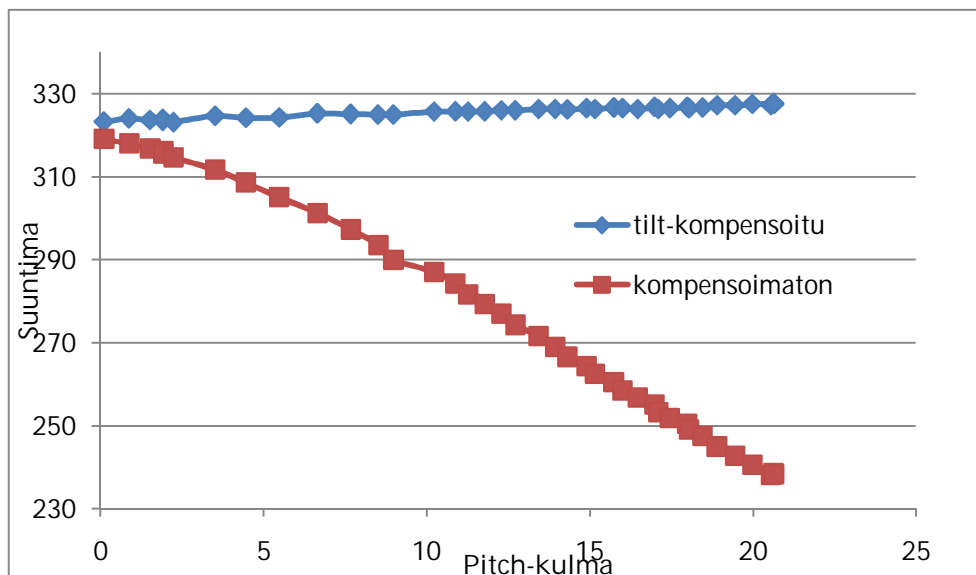
3D-kompassin perustarkkuus testattiin tekemällä sarja perättäisiä 90 asteen kääntöjä kaivinkoneen asennon ollessa mahdollisimman lähellä horisontaalitasoa. Taulukossa Taulukko 4.1 nähdään tyypillisen kääntösarjan tulokset. Yhden kääntösarjan kuluessa kaivinkoneen ylärunkoa käännettiin yhteensä 270 astetta kolmella 90 asteen askeleella. Taulukon Taulukko 4.1 testissä kaivinkone oli molempien akseleiden suhteen 0.5 asteen tarkkuudella horisontaalitasossa. Kaivinkoneen puomisto pidettiin käännöissä samassa asennossa kun kalibroitaessa. Toistotarkkuus oli tyypillisesti 0.2 – 0.3 astetta.

Taulukko 4.1: 3D-kompassin 90 asteen käännöt horisontaalitasossa

Vertailukulma	3D- kompassin antama	Virhe	Yksikkö
0	0	0	°
90	89.4	-0.6	°
180	181.4	1.4	°
270	270.4	0.4	°

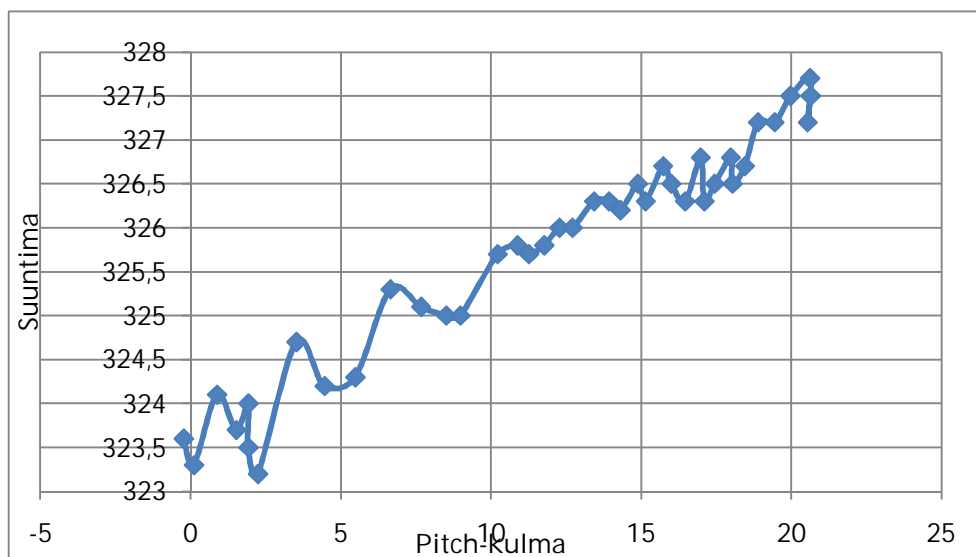
Kompassin tilt-kompensoinnin toimivuus testattiin nostamalla kaivinkoneen etuosaa ylöspäin käyttämällä koneen puomistoa nostimena. Koneen todellisen suuntiman tulisi

pysyä tällöin vakiona. Kuva 4.3 nähdään kuinka punaisella merkitty kompensoimaton kulma romahtaa noin 70 astetta pitch-kulman kasvaessa nollasta noin kahteen kymmeneen asteeseen. Ylempi, sininen kuvaaja havainnollistaa tilt-kompensoidun kulman huomattavasti paremman käyttäytymisen samaisessa kallistuksessa.



Kuva 4.3: Tilt-kompensoidun ja kompensoimattoman suuntiman vertailu

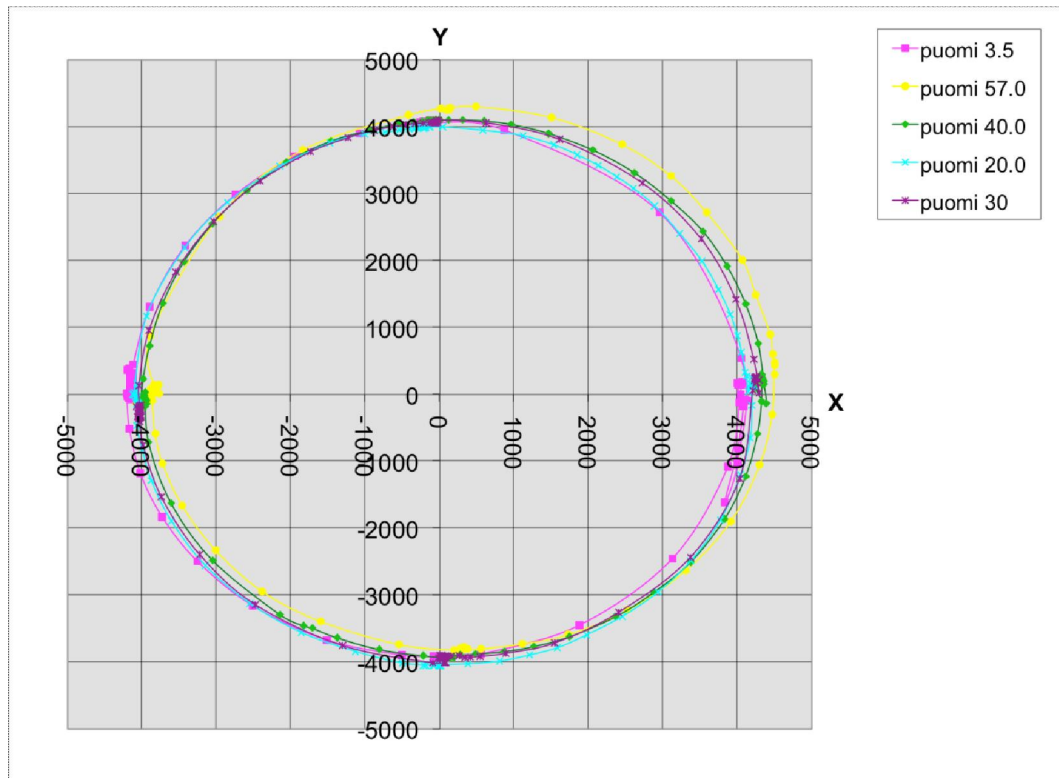
Kuvassa Kuva 4.4 nähdään suurennus kuvan Kuva 4.3 tilt-kompensoidusta suuntimasta. Suurennus paljastaa noin 20 asteen kaivinkoneen pituusakselin suuntaisen kallistuksen vaikuttavan kompensoituun suuntimaan noin 4.5 astetta.



Kuva 4.4: Tilt-kompensoitu suuntima koneen etuosaa nostettaessa

Puomiston asennon vaikutusta magneettikenttään tutkittiin tekemällä 360 asteen pyöryksiä horisontaalitasossa eri pääpuomikulmilla. Mitä suurempi kulma, sitä korkeammalla puomien kauhan puoleiset päät ovat. Pääpuomin kulman kasvaessa

kutistuu myös puomin ja suuntima-anturin välinen etäisyys. Kolmen ja puolen asteen puomikulmalla pääpuomi osoittaa hieman horisontin yläpuolelle. Taittopuomi pidettiin koko ajan täysin ojennettuna pääpuomin suhteen. Pyöryksistä saaduista magneettiantureiden XY-datapareista piirretyt kuvaajat nähdään kuvassa Kuva 4.5. Pidettäessä koneen ylävaunu paikallaan ja nostettaessa pääpuomi ala-asennosta eli 3.5 asteen kulmasta 57:ään asteeseen syntyi suuntimaan 2.5 – 3.4 asteen virhe.



Kuva 4.5: 360 asteen pyörykset horisontaalitasossa eri puomikulmilla

CRS03-gyroanturin soveltuvuutta paikan mittaukseen arvioitiin tekemällä koe, jossa horisontaalitasossa olevan kaivinkoneen ylävaunua käännettiin vaihtelevalla nopeudella ja askelilla kymmenen minuutin ajan, jonka jälkeen ylävaunu ajettiin takaisin lähtöposition. Kokeen onnistumisen mittarina toimi anturin antaman paikan ja todellisen sijainnin eli lähtöposition erotus. Tyypillisesti kokeessa päästiin noin 1-2 asteen erotukseen, mikäli moduulin sisäinen lämpötila pysyi vakiona koko testiajon.

4.3. Kenttätestauksen analyysi

Suuntima-anturin asennus onnistui melko hyvin. Sen mitta-akselit saatiin yhdensuuntaisiksi koneen koordinaatiston kanssa ilman erikoismittalaitteita, mikä on lopputuotteen asennettavuuden kannalta hyvä asia. Maston orientaation säätömenetelmä

ei sen sijaan ollut käytettävyydeltään hyväksyttävä. Ongelma olisi kuitenkin helposti korjattavissa tiheäkierteisillä säätöruuveilla.

Magneettiantureiden kalibrointi osoittautui ongelmalliseksi. XY-tason kalibroinnin perusvaatimus eli kaivinkoneen saaminen horisontaalitasoon osoittautui kenttäolosuhteissa käytännössä mahdottomaksi tehtäväksi ilman erillistä säädettävää alustaa, jonka päälle kaivinkone voitaisiin ajaa. Tällaista tasoa ei ollut käytössä. Vaaitusongelma vielä korostuu Suomen leveyspiirien tasalla magneettikentän suuntautuessaa täällä esimerkiksi Keski-Eurooppaan verrattuna huomattavasti jyrkemmässä kulmassa kohti maata. Jyrkästä kulmasta seuraa se, että magneettikentän X- ja Y-suuntaiset komponentit ovat heikkoja Z-komponenttiin nähden. Tämä taas korostaa tilt-kulman vaikutusta suuntimaan. Ja koska XY-kalibroinnissa ei Z-komponenttia huomioida, tulee vaaitusepätkä tarkkuus kompensoiduksi osana hard iron -ilmiötä, jolloin kalibroitu anturi tuskin on kovin tarkka muuten kun juuri kalibrointiasennossaan.

Z-akselin magneettianturin kalibroinnille ei löydetty hyvää menetelmää. Koneen etupään kallistamisen perusteella arvioitu Z-akselin offset todennäköisesti kohtuullisesti suuntiman tilt-kulmaherkkyyttä, mutta Z-akselin skaalauksen kompensoinnin puuttuessa Z-akselin painoarvo jäi todennäköisesti kuitenkin ylikorostuneeksi.

Kokonaisuutena magneettiantureiden kenttäkalibrointeja ei voida pitää tuotantovalmiina. Tarkkuusongelmien lisäksi ne ovat liian raskaita jopa ainoastaan kerran asennuksen yhteydessä tehtäviksi saati sitten, että kalibrointeja olisi tehtävä päivittäin tai sitäkin useammin.

Gyron biaksen kenttäkalibrointi osoittautui periaatteessa toimivaksi, joskaan sekään ei sovellu sellaisenaan valmiiseen tuotteeseen käytön aikaiseksi kalibroinniksi. Lämpötilakalibroinnit sekä herkkyyden että biaksen suhteen olisi luontevinta tehdä lämpökammiossa koko käyttölämpötila-alueelle jo suuntima-anturin valmistusvaiheessa. Tarkkuus tosin ei välttämättä vastaisi aivan kenttäkalibrointia johtuen erityisesti siitä, että lämpötilakalibrointi minuutin kalibrointijaksoin ja 0.1 celsius asteen askelin läpi käyttölämpötila-alueen olisi liian aikaa vievää ja siten kallista toteuttaa.

90 asteen horisontaalitasossa tehdyissä käännöissä mitattu suuntiman perustarkkuus oli tyypillisesti 1.5 asteen luokkaa, mikä jäi hieman kriteeriksi asetetusta ± 0.5 asteesta eli saavutettu tarkkuus ei ole aivan koneenohjauskäyttöön riittävä. Toisaalta, koska horisontaalitasoon käännöissä ei käytetä tilt-kompensointia, eikä konetta saatu koskaan täysin vaaitettua, voi hyvinkin olla, että onnistuneemmalla vaaituksella tarkkuustavoite olisi saavutettu ainakin nyt horisontaalitasossa. Lisäksi suuntiman toistettavuus oli huomattavasti absoluuttista tarkkuutta parempi, mikä antoi viitteitä, että testituloksia parempikin tarkkuus olisi kuitenkin saavutettavissa. Testijärjestelyn puutteiden lisäksi merkittävä virhelähde on suuntima-anturin XY-tason kalibroinnin ongelmat.

Tilt-kompensointi todettiin periaatteeltaan toimivaksi. Samalla nähtiin kuinka kompensoimaton suuntima ei kestä käytännössä lainkaan suuntima-anturin kallistamista. Kompensoimattoman suuntiman virhe oli vielä huomattavasti kuvassa Kuva 2.15 nähtävää virhettä suurempi, mikä johtunee siitä, että magneettikentän dip-kulma on Suomessa noin 75 astetta, joka on huomattavasti kuvassa käytettyä 40 astetta suurempi [19].

Tilt-kompensoitunakaan suuntiman tarkkuus ei kuitenkaan ole riittävä koneenohjaukseen. Neljän asteen suuntimavirhe noin 20 asteen tilt-kulman muutoksella ei ole mitenkään hyväksyttävissä. Mittaustuloksiin saattoi heikentää hieman se, että koneen asentoa muutettiin koneen oman puomiston avulla, jolloin puomisto liikkui testin aikana, minkä taasen todettiin testeissä jo yksinäänkin aiheuttavan virhettä suuntimaan. Puomin liike oli kuitenkin nyt huomattavasti rajottuneempi kun puomiston asennon vaikutuksia tutkineessa testissä.

Puomiston asennon vaikutusta tutkittiin tekemällä horisontaalitasossa 360 asteen tasanopeuksisia pyöriä eri puomikulmilla. Kuvassa Kuva 4.5 nähdään selvästi, että puomikulma vaikuttaa magneettikenttään. Suuntimana muutos oli noin 3 astetta ääriasentojen välillä. Myös tämä virhe on koneenohjaukseen selkeästi liian suuri. Virhettä voitaisiin todennäköisesti kompensoida ajamalla magneettiantureiden kalibroinnit muutamalla puomikulmalla, joiden perusteella suuntima-anturi voisi interpoloida sopivat korjauskertoimet ajonaikaisesti kulloisellekin puomiston asennolle. Järjestelmään ei tarvitsisi tehdä tämän takia isoja muutoksia, sillä puomien kulmainformaatio on jo valmiiksi suuntima-anturin saatavilla CAN-väylällä.

Gyro-anturin tarkkuus paikannuskäytössä oli positiivinen yllätys virheen jäädessä kymmenen minuutin testijaksolla monesti noin yhteen asteeseen, mitä voidaan pitää rate-luokan kohtuuhintaiselle gyro-anturille jo varsin hyvänä saavutuksena. Stabiilius perustui todennäköisesti hyvin pieneen kotelon sisälämpötilan vaihteluun ja tarkalleen kyseisessä lämpötilassa pitkäköllä näytteistysajalla haettuun biakseen. Saman tarkkuuden saavuttaminen normaalin käytön aikana olisi epätodennäköistä.

Pelkästään nyt tehtyjen hyvin eristettyjenkin testien perusteella maan magneettikentän suunnan ja voimakkuuden mittaamiseen perustuva kaivinkoneen suuntima-anturi osoittautui vähintään vaikeasti toteutettavaksi. Kenttäkalibroinnit olivat haastavia ja virheherkkiä ja kaivinkoneessa itsessään on paljon paitsi paikallaan pysyviä, niin myös liikkuvia rakenteita luomassa staattisia sekä dynaamisia magneettikentän anomaliaita. Kohdatut vaikeudet olivat niin merkittäviä, että anturia ei päästy testaamaan laisinkaan varsinaisessa työsuoritteessa eli kaivuutyössä. Selvittämättä jäi myös herkkyys kaivinkoneen sähkölaitteille, kalibroinnin siirrettävyys edes yksittäisen työmaan sisällä sekä herkkyys normaalille työskentely-ympäristölle eli esimerkiksi rakennuksille ja ohiajajille kuorma-autoille.

5. PÄÄTELMÄT JA YHTEENVETO

Kaivinkoneen työnohjaukseen soveltuvan, kustannustehokkaan ja tuotantovalmiin suuntima-anturin kehittäminen osoittautui ennakoituakin vaikeammaksi tehtäväksi. GNSS-teknologian ollessa rajattu pois mahdollisista teknologiavaihtoehdoista päädyttiin kirjallisuusselvityksen perusteella suunnittelemaan rate-luokan gyroskoopin avustama, sähköisesti kallistuskompensoitu sähköinen kompassi. Teknologia- ja komponenttivalintoja rajasi tehokkaasti myös suuntima-anturimoduulille määritelty enimmäisomakustannehinta, joka esti valmiiden inertiaalinavigointimoduulien sekä taktisen ja inertiaali-luokan gyroskooppi-antureiden hyödyntämisen.

Piirikaaviosuunnittelu anturi- ja komponenttivalintoineen kuten myös piirilevysuunnittelu sujuivat hyvin osittain melko haastavastakin analogia- ja sekasignaalisuunnittelusta huolimatta. Ohjelmistokehitys tehtiin pääosin alihankintana. Laitteiston ja ohjelmiston integrointi sujui ongelmitta ja laitteiston hinta pysyi budjettikehyksessään.

Jo ennakolta osattiin aavistella, että kaivinkone ei ole maan magneettikenttää mittaavalle anturille helppo toimintaympäristö. Asia varmistui heti ensimmäisissä kenttätesteissä, joissa testialustana toimi noin kolmenkymmenen tonnin painoinen, telalustainen kaivinkone.

Asennuksessa noin metrin mittaisen maston päähän kiinnitetyn suuntima-anturin orientaatiota säädettiin kunnes anturin mitta-akselit olivat kaivinkoneen ylärungon paikalliskoordinaatiston akseleiden kanssa yhdensuuntaisia.

Ennen varsinaista testausta suuntima-anturi oli kalibroitava. Kaivinkoneen aiheuttamat magneettiset anomaliat yritettiin poistaa suuntima-anturin hard iron - ja soft iron -kalibroinneilla. Kalibroinnit osoittautuivat hyvin vaikeiksi toteuttaa kenttäolosuhteissa ilman kaivinkoneelle suunniteltua vaaitustasoa. X- ja Y-magneettiantureiden kalibroinnissa kaivinkoneen saaminen horisontaalitasoon olisi ensiarvoisen tärkeää, mutta ilman edellä mainittua vaaitustasoa, tehtävä todettiin käytännössä mahdottomaksi. Vaaitusongelmat näkyivät epätäydellisinä kalibrointeja, jotka osaltaan vaikuttivat edelleen saavutettuun suuntiman perustarkkuuteen. Z-akselin magneettianturin kalibroinnille ei löydetty tyydyttävää tapaa, mikä loi epätarkkuutta kompassin tilt-kompensointiin.

Gyro-anturin bias saatiin kenttäolosuhteissa kalibroitua tarkaksi, mutta pitkä kalibrointiaika yhdistettynä olettavasti usein toistuvaan kalibrointitarpeeseen estävät menetelmän käytön sellaisenaan lopputuotteessa.

Kokonaisuutena kalibroinnit eivät olleet riittävän helppoja edes kerran asennuksen yhteydessä tehtäviksi saati sitten päivittäin tai jopa useamminkin, mihin todennäköisesti tulisi tarvetta kaivinkoneen siirtyessä työmaalta toiselle ja kenties toisinaan jopa yksittäisellä työmaalla liikuttaessa.

Kenttätesteissä keskityttiin tapaustesteihin, joissa suuntima-anturin toimivuutta pyrittiin testaamaan yhden muuttujan suhteen kerrallaan. Kompassiosio ja gyro-anturi testattiin erikseen itsenäisinä antureina.

Kompassiosion perustarkkuustestissä horisontaalitasossa olevan kaivinkoneen ylävaunua käännettiin tunnettuihin suuntiin. Kompassin antamaa ja tunnettuja suuntimia verrattaessa todettiin, että kaivinkoneen työnohjauksessa edellytettävää tarkkuutta ei aivan saavutettu edes ideaalisessa testitapauksessa, jossa kone on lähes vaaitettu ja puomit sekä koneen runko samassa asennossa kuin kalibroitaessa, koneen ollessa huojahtelematta normaalin työsuorituksen tapaan ja ympäristössä ei ole magneettisten anomalioiden lähteitä kuten rakennuksia tai toisia työkoneita.

Kompassin tilt-kompensointi todettiin periaatteessa toimivaksi ja tarkkuus kompensoimattomaan suuntimaan verrattuna noin kaksikymmenkertaiseksi, mutta kuitenkin koneenohjauskäyttöön riittämättömäksi.

Kaivinkoneen puomisto muodostaa muuttuvien magneettisten anomalioiden lähteet suuntima-anturin välittömään läheisyyteen. Puomiston asennon vaikutus suuntimaan todettiin testeissä useamman asteen suuruiseksi, mikä ylittää jälleen sallitun enimmäisvirheen.

Kokonaisuutena kompassiosin testeissä kävi selkeästi ilmi, että ainakin puhtaasti sähköiseen kompassiin perustuvan suuntima-anturin kehittäminen kaivinkoneen työnohjaukseen on vähintäänkin erittäin haasteellinen, kenties jopa mahdoton tehtävä. Ja testaamatta jäi vielä todellisen työsuorituksen aiheuttamat ongelmat suuntiman määrittämiseen. Koneen tärinät, ohi ajavat kuorma-autot ja suuret lämpötilavaihtelut eivät ainakaan oletettavasti parantaisi mittaustarkkuutta eivätkä varsinkaan suuntiman luotettavuutta.

Silicon Sensing CRS-03 rate-luokan gyro-anturin muutaman minuutin paikannuskäyttöön hyvinkin riittävä stabiilius oli hienoinen yllätys. Keskeisellä sijalla saavutuksessa oli todennäköisesti suuntima-anturin sisälämpötilan onnistunut vakiointi niin, että lämpötila ei havaittavasti muuttunut kalibroinnin eikä sitä välittömästi seuranneen testin aikana.

Varsinaista kompassin ja gyro-anturin anturifuusiota ei kehitetty, kompassiosion kalibroitio ongelmien ja erillistesteissä havaittujen tarkkuusongelmien vuoksi. Gyro-anturin magneettiantureiden hetkellisten häiriöiden kompensointiin hyvinkin riittävästä tarkkuudesta ei ole juurikaan apua, kun koko suuntima-anturin perustarkkuuden ja luotettavuuden määräävä kompassiosio ei selviä tehtävästään.

GNSS-tekniikan apuna toimivan ja myös autonomiseen suuntiman määrittämiseen sopivan kaivinkoneen suuntima-anturin kehittäminen tulevaisuudessa riippuu pitkälti anturitekniikan ja erityisesti gyro-antureiden kehityksestä. Kun muutamalla sadalla eurolla saadaan inertiaali- tai taktisen luokan gyroskooppianturi, helpottuu tehtävä huomattavasti. Ratkaistavaksi jää tosin tällöinkin, ainakin itsenäisen suuntima-anturin tapauksessa, lopulta varmuudella vastaan tuleva referenssisuuntimaongelma. Kuka kertoo gyro-anturille oikean suuntiman, kun suuntimaan vääjämättä kumuloituva virhe ylittää lopulta sallitun enimmäisvirheen. Ehkä tähän löydetään vielä vastaus tarkastelemalla ongelmaa kokonaan uudesta perspektiivistä.

LÄHTEET

- [1] CAN Specification part B [WWW]. Saatavissa:<http://www.can-cia.org>. Erlangen, CAN in Automation, 38 s.
- [2] CiA Draft Standard Proposal 301, version 4.2. [WWW]. Saatavissa:<http://www.can-cia.org>, 2007, CiA, 150 s.
- [3] Real-time data transmission [WWW]. [viitattu 10.5.2010]. Saatavissa:<http://www.can-cia.org/index.php?id=87>,
- [4] MC-INC User manual V2.08 [WWW]. Saatavissa: <http://axiomatic.fi/Www/MVINC-CO-x>. 65 s.
- [5] Jeffrey, C. An Introduction to GNSS. Calgary 2010, NovAtel inc. 86 s.
- [6] VTI Hamlin. SCA610-CA1H1G Data sheet [WWW]. [viitattu 13.5.2010]. Saatavissa: <http://www.vti.fi/en/products/inclinometers/inclinometers/>. 3 s.
- [7] Caruso, M. Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems, Technical article [WWW]. [viitattu 12.5.2010]. Saatavissa: <http://www.honeywell.com/sites/portal?smap=aerospace&page=Literature&theme=T5>, 8 s.
- [8] Konvalin, C., Compensating for Tilt, Hard-Iron, and Soft-Iron Effects [WWW]. [viitattu 12.5.2010]. Saatavissa:<http://www.sensorsmag.com/sensors/motion-velocity-displacement/compensating-tilt-hard-iron-and-soft-iron-effects-6475>. 2009
- [9] Caruso, M., Smith, C., Bratland, T., Scheiner, R. A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Technical article [WWW]. [viitattu 12.5.2010]. Saatavissa:<http://www.honeywell.com/sites/portal?smap=aerospace&page=Literature&theme=T5>. 1998, Honeywell. 19 s.
- [10] Yazdi, N., Ayazi, F., and Najafi, K. Micromachined Inertial Sensors. Proceedings of the IEEE 86 8 (1998). ss 1640 -1659

- [11] Grewal, M., Weill, L., Andrews, A. Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration. 2nd edition. New Jersey 2007, Wiley & Sons, inc. 525 s.
- [12] VTI Hamlin. SC61T Data sheet [WWW]. [viitattu 13.5.2010]. Saatavissa:http://www.vti.fi/en/products/accelerometers/automotive_analog/. 18 s.
- [13] Silicon Sensing. CRS03 Data sheet [WWW]. [viitattu 13.5.2010]. Saatavissa: <http://www.siliconsensing.com/CRS03>. 2 s.
- [14] Analog Devices ADIS16255 Programmable Low Power Gyroscope Data Sheet Rev C [WWW]. [viitattu 14.5.2010]. Saatavissa:<http://www.analog.com/en/other-products/multi-chip/adis16255/products/product.html>. 20 s.
- [15] Honeywell. 3-Axis Compass Sensor Set HMC1055 Data Sheet [WWW]. [viitattu 12.5.2010]. Saatavissa:<http://www.honeywell.com/sites/portal?smap=aerospace&page=Literature&theme=T5>. 11 s.
- [16] Honeywell. 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001 / 1002 HMC1021 / 1022 Data Sheet [WWW]. [viitattu 12.5.2010]. Saatavissa:<http://www.honeywell.com/sites/portal?smap=aerospace&page=Literature&theme=T5>. 15 s.
- [17] Linear Technology. LTC2446/LTC2447 Data Sheet [WWW]. [viitattu 14.5.2010]. Saatavissa:<http://www.linear.com/pc/productDetail.jsp?navId=H0,C1,C1155,C1001,C1152,P7594>. 28 s.
- [18] Rotator oy. Hitachi ZX280LC-3 esite [WWW]. [viitattu 14.5.2010]. Saatavissa:<http://http://www.rotator.fi/index.php?mid=2&pid=4#2|26>. 28 s.
- [19] Oulun Yliopiston Geofysiikan laitos. Geofysiikka-sanaston selitykset [WWW]. [viitattu 18.5.2010]. Saatavissa: http://physics.oulu.fi/geofysiikka/geof_selitykset.html.